

兰州大学中子发生器研制及应用展望

姚泽恩

zeyao@lzu.edu.cn

兰州大学中子应用技术教育部工程研究中心
兰州大学中子物理与中子应用技术研究
兰州大学核科学与技术学院

2023年09月20日

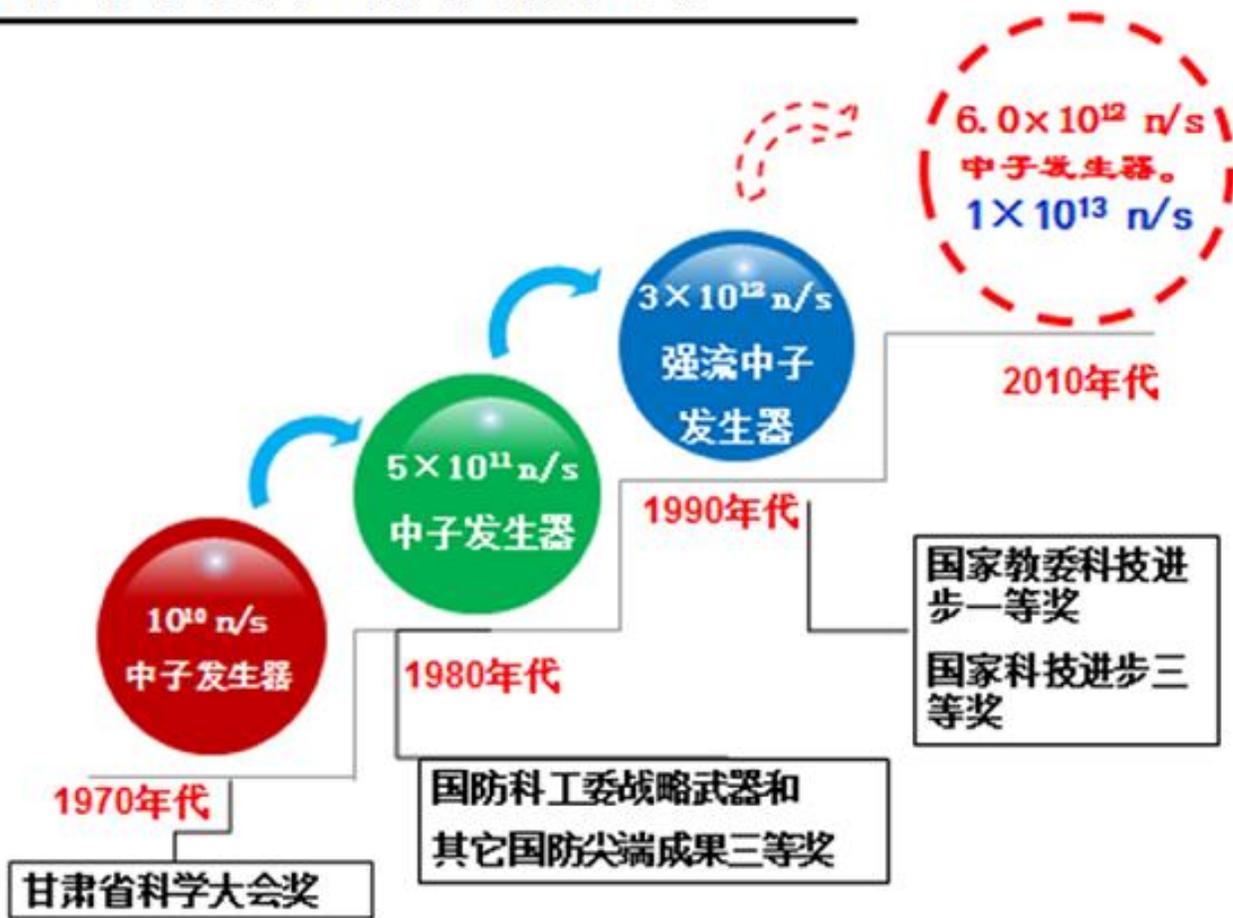
汇报内容

- 一、历史回顾
- 二、新一代强流中子发生器研制及应用展望
- 三、紧凑型中子发生器研制
- 四、中子发生器中子辐射场研究
- 五、紧凑型中子发生器应用及展望
- 六、总结

一、历史回顾

1、强流中子发生器技术研究

40余年中子发生器研制及应用



ZF-300强流中子发生器——1988

◆ 主要指标:

- D束流能量: 300keV
- D束流强度: 30mA
- D-T中子产额: 3.3×10^{12} n/s

◆ 水平:

- 国内第一台达到 10^{12} n/s量级中子发生器,
- 国际先进, 国家科技进步奖

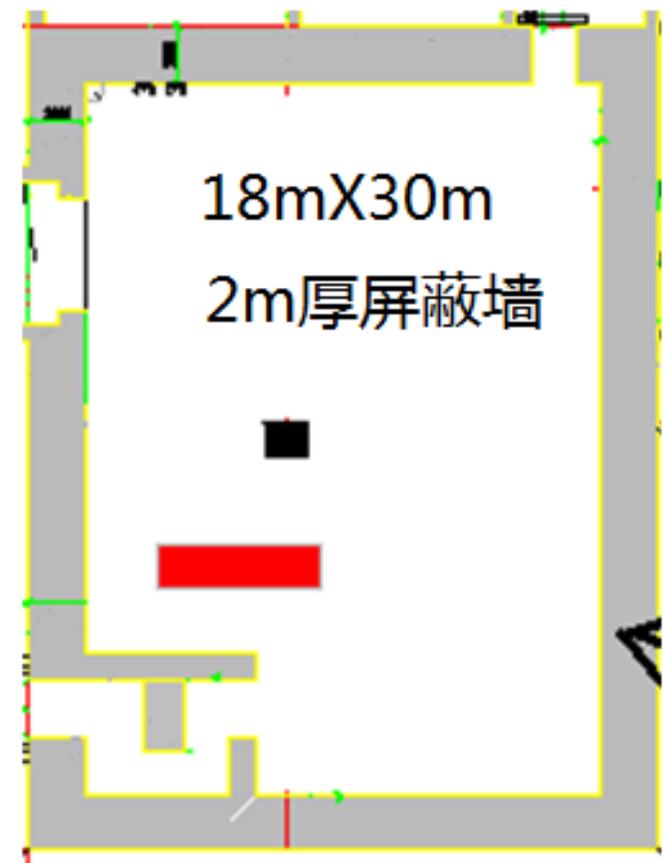
一、历史回顾

2、中子物理与中子应用技术研究工作

- ★ 完成了70多核素几百个反应道的快中子反应截面测量——活化法
(包括军工核数据——总装备部授予《国防预先研究先进集体》称号)；
- ★ 承担了“863计划”聚变裂变混合堆第一壁材料的快中子辐照损伤研究；
- ★ 完成了抗辐射加固预研项目和2000多个元件的抗辐射加固模拟实验；
- ★ 兰州近代物理所完成了Hf-185新核素的合成；
- ★ 开展了快中子辐射生物学及辐照育种研究——培育了4个小麦新品种；
- ★ 开发了动态物料中子测水系统——成功应用与金川公司、酒钢公司生产线

一、历史回顾

- 2006年， ZF-300强流中子发生器停止运行；
- 2007年， 重启中子物理与技术实验室建设；
- 2008年， 中子物理实验楼建成（2500M²； 18mX30m大厅）
- 2009年， 完成ZF-300强流中子发生器的搬迁、改造；
- 2011年， 启动新一代强流中子发生器研制工程；



汇报内容

- 一、历史回顾
- 二、新一代强流中子发生器研制及应用**
- 三、紧凑型中子发生器研制
- 四、中子发生器中子辐射场研究
- 五、紧凑型中子发生器应用及展望
- 六、总结

二、新一代强流中子发生器研制及应用

1、 5×10^{12} n/s强流中子发生器研制进展

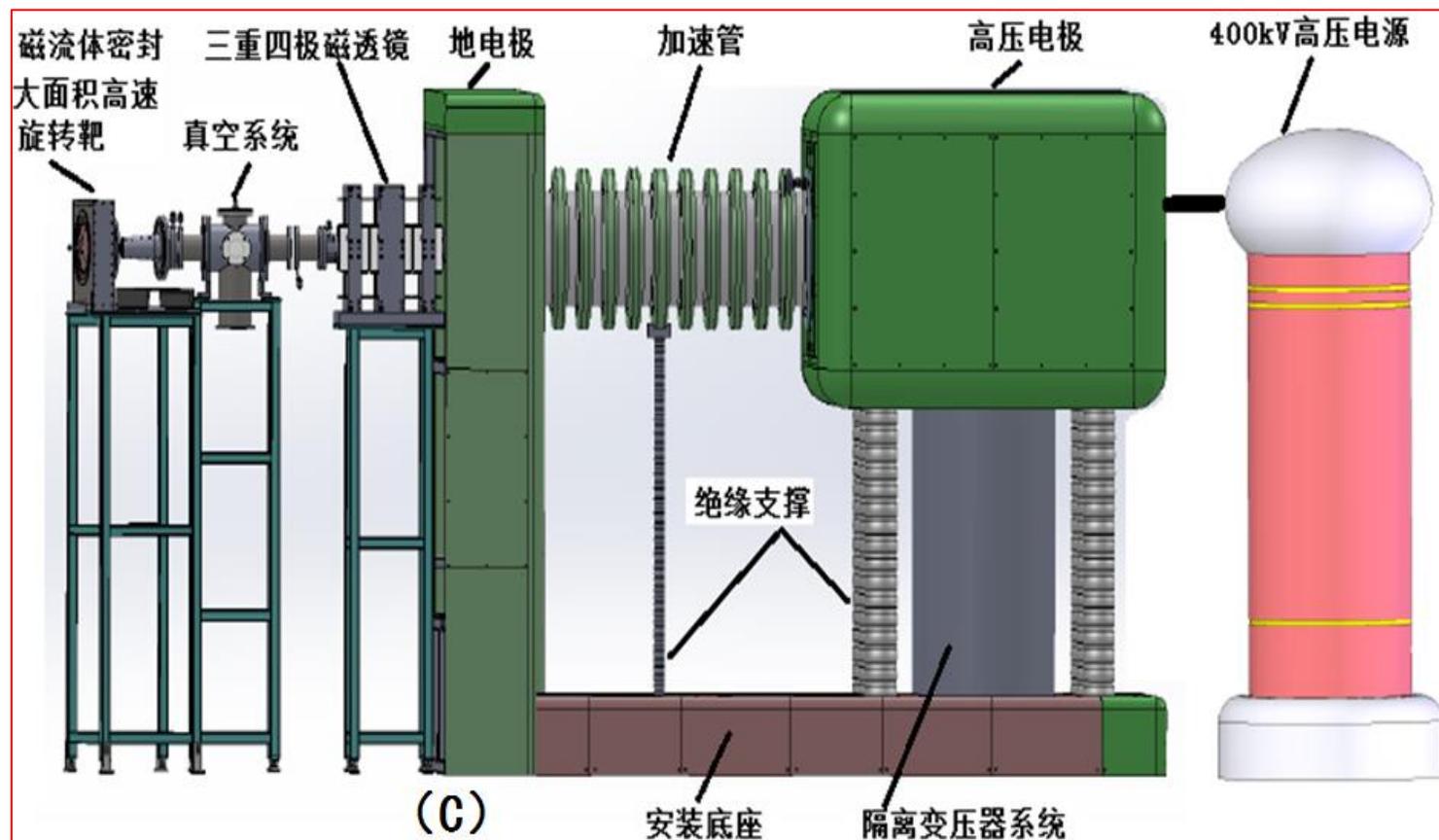
- 2011年，启动ZF-400（I、II）强流中子发生器研制工程；
- 国家自然科学基金科学仪器基础研究项目（2011-2013）
- 国家自然科学基金重大科学仪器研究项目（2014-2018）
- “985工程”

★ 结构

★ 技术指标

- ◆ D能量：400keV；
- ◆ D束流强度： $> 40\text{mA}$ ；
- ◆ 大面积磁流体密封高速旋转靶；
- ◆ 产额：
D-T： $> 5 \times 10^{12}$ n/s
D-D： $> 5 \times 10^{10}$ n/s

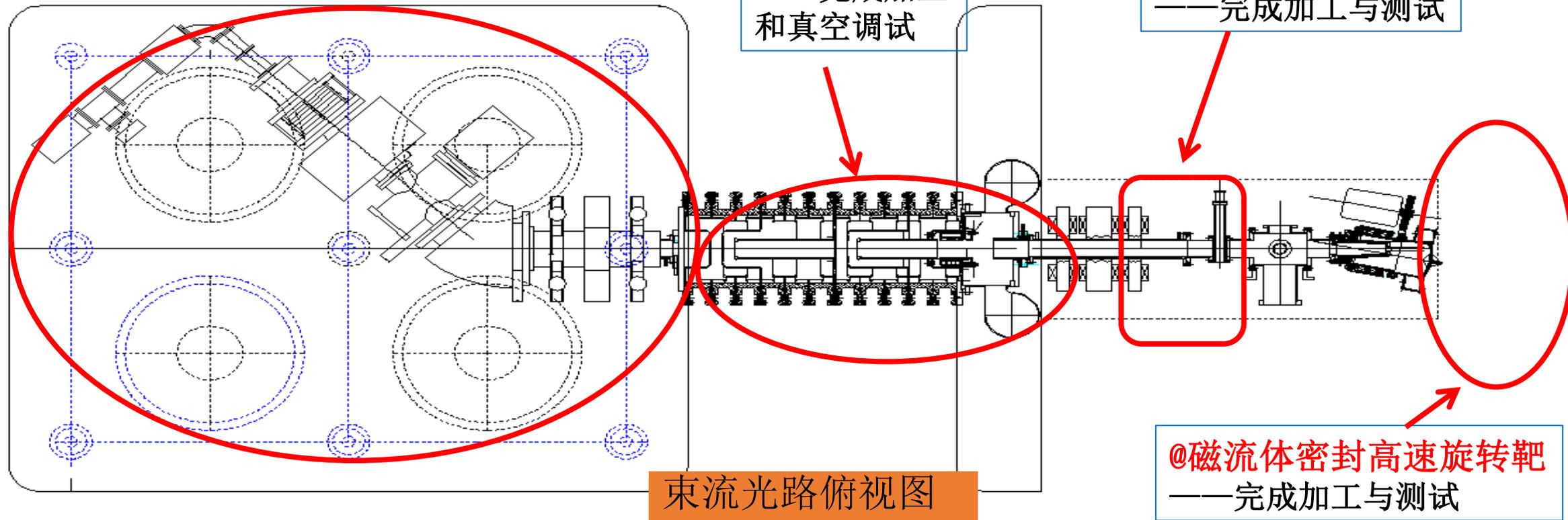
——关键元件及技术突破，
——已完成安装



@ 离子源、前分析及低能束线
——完成加工，束流调试中

@强流加速管
——完成加工
和真空调试

@三组合四极透镜
——完成加工与测试



束流光路俯视图

@磁流体密封高速旋转靶
——完成加工与测试

进展与计划

- 完成了各系统安装和初步调试；
- 2020年，获得核材料氙使用许可证
- 2023年，氙钛靶制备完成并运抵实验室；
- 2023年12月前，完成D-T中子出束，中子产额达到 10^{12} n/s

二、新一代强流中子发生器研制及应用

2、强流中子发生器应用目标

1) 中子物理研究

- 活化法中子核数据测量 (长期工作) ;
- 关键军用核数据实验测量 (已列入计划)
- 中子诱发铜系核素裂变物理研究;

2) 中子应用技术研究

- 快中子辐射生物学效应与辐照育种;
- 半导体快中子辐照及抗辐射加固;
- 核设施元件快中子辐照考核;
- 快中子照相;
- 快中子探测器研制与测试
- 快中子标准辐射场及辐射剂量
- ? ?

二、新一代强流中子发生器研制及应用

2、强流中子发生器应用目标

1) 中子物理研究

——中子诱发铜系核素裂变物理研究

◆ 裂变研究存在问题

★ 理论:

——没有一套好的理论能够普适、精确计算裂变后物理量。

★ 实验:

——中子引起裂变核数据精确实验测量仍然是难题。如独立产额；

★ 数据库建设:

——裂变数据缺失多；
——评价数据精度不够，分歧大。

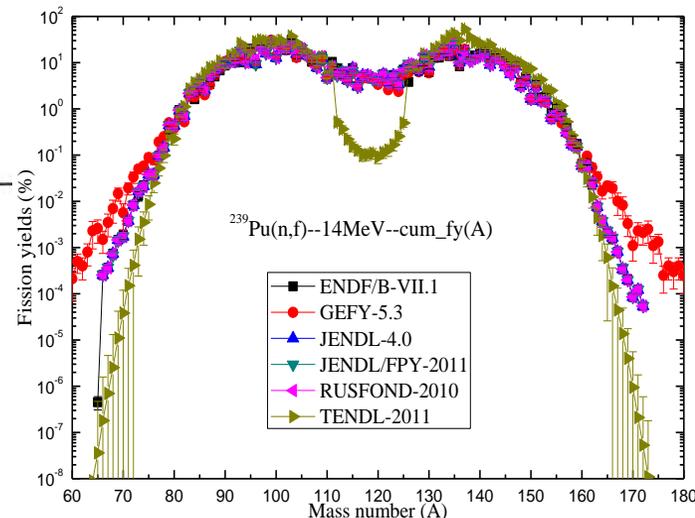
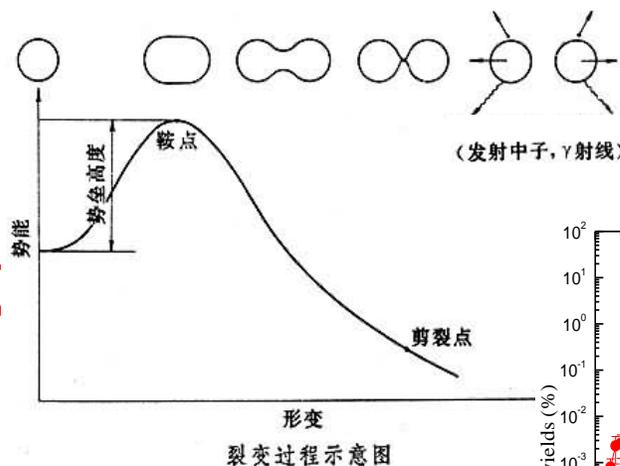


表 1.2.1 各个核数据库对 $^{232}\text{Th}(n,f)$ 、 $^{238}\text{U}(n,f)$ 反应评价数据情况

核素	Data	CENDL-3.1	ENDF/B-VII.1	JEFF-3.1	JENDL-4.0	RUSFOND-2010
^{232}Th	(n,f) cross section	√	√	√	√	√
	fission yields	No data	0.5 MeV、 14 MeV	0.4 MeV、 14 MeV	0.5 MeV、 14 MeV	0.5 MeV、 14 MeV
^{238}U	(n,f) cross section	√	√	√	√	√
	fission yields	No data	0.5 MeV、 14 MeV	0.4 MeV、 14 MeV	0.5 MeV、 14 MeV	0.5 MeV、 14 MeV

——裂变物理仍是前沿课题

二、新一代强流中子发生器研制及应用

2、裂变物理理论研究进展

1) 裂变驱动势模型发展与裂变产物计算

——构建了新的断点处裂变驱动势模型

$$D = U_{sym}(A_f) + U_{asym}(A_f)$$
$$= D(A_{sym}) \cdot \exp\left[-\frac{(A_f - A_{sym})^2}{2\sigma_{sym}^2}\right] + \sum_i \eta_i \cdot D(A_{asym,i}) \cdot \exp\left[-\frac{(A_f - A_{asym,i})^2}{2\sigma_{asym,i}^2}\right]$$

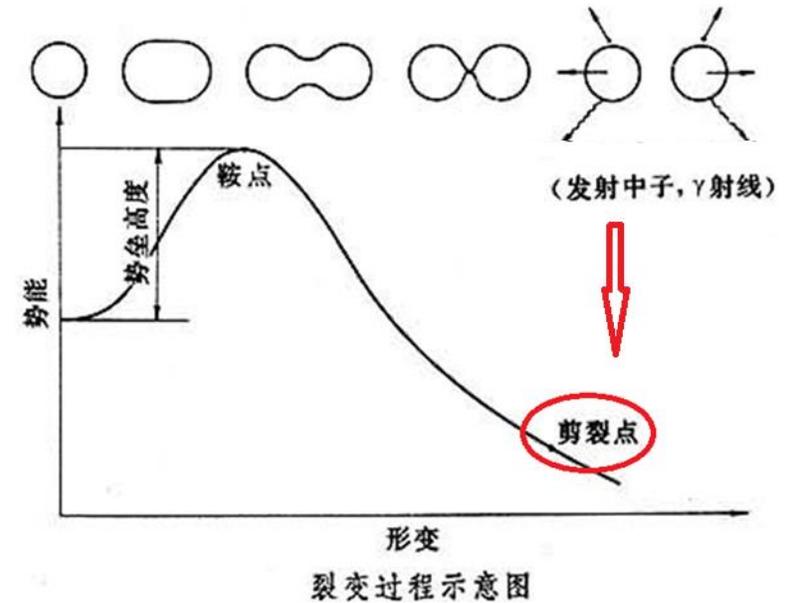
$U_{sym}(A_f)$ ——核子-核子对称裂变势； $U_{asym}(A_f)$ ——核子-核子非对称裂变势

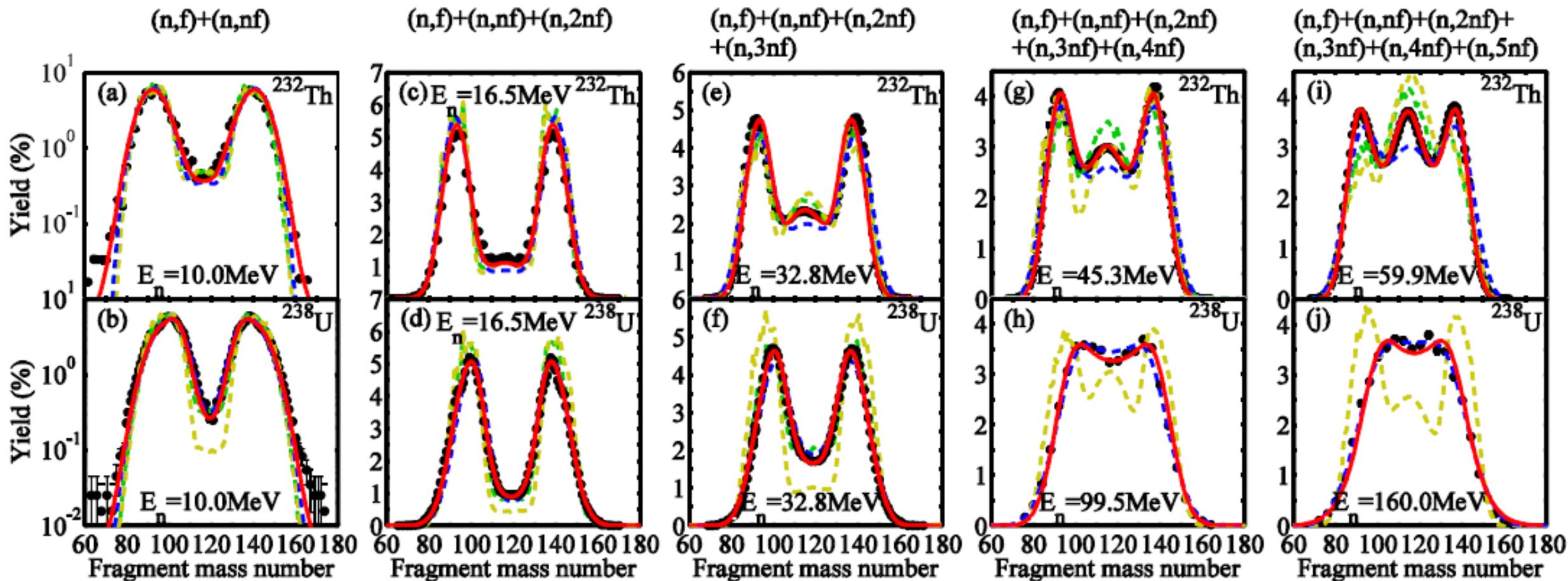
——构建发射中子前裂变碎片质量分布模型

$$F(A_f) = C \times \left[\frac{U_{asym}(A_f)}{T(A_{CN})} + \omega \cdot \frac{U_{sym}(A_f)}{T(A_{CN})} \right]$$

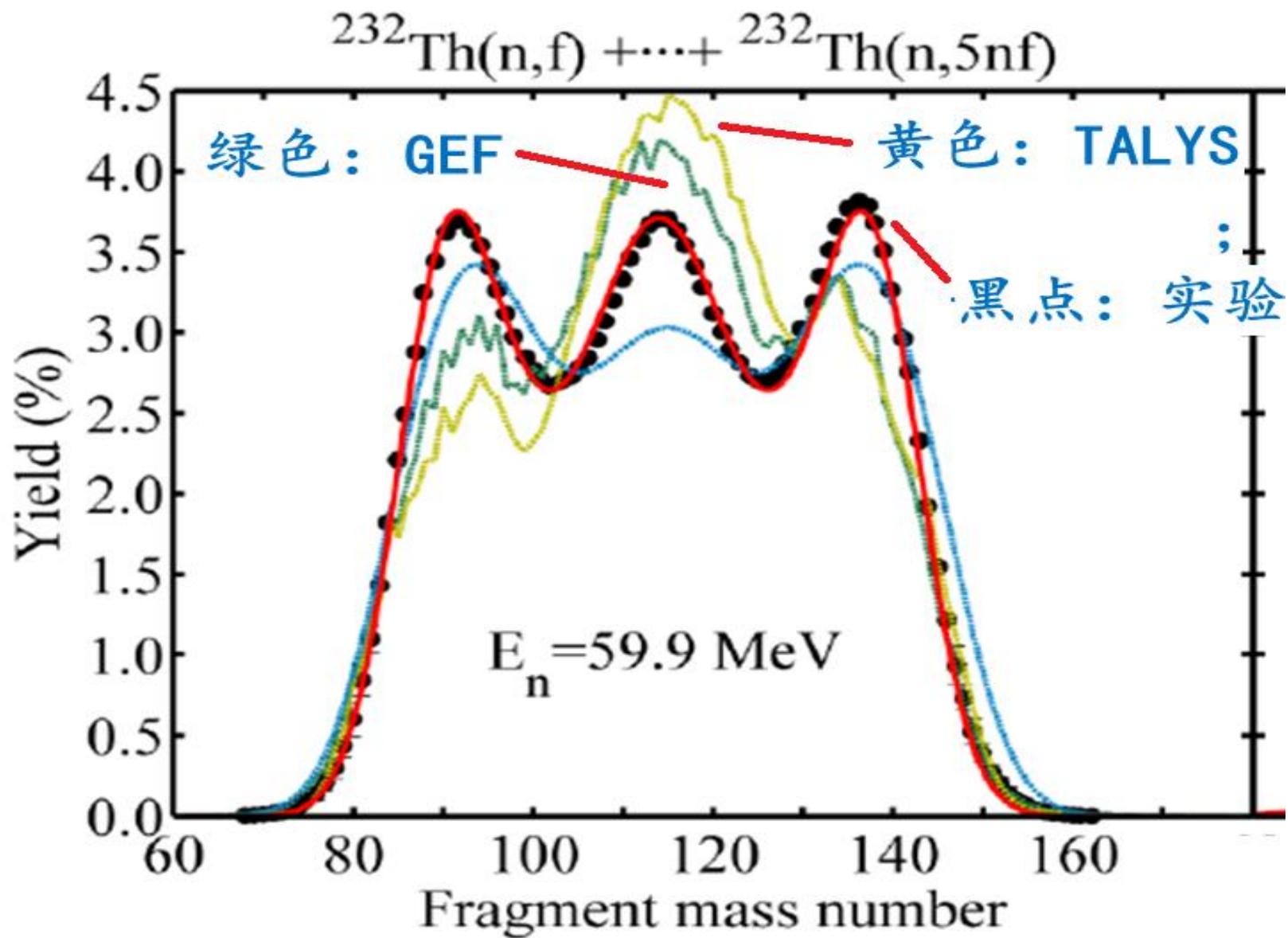
$$C = \frac{200\%}{\int_0^A [U_{asym}(A_f) + \omega \cdot U_{sym}(A_f)] \cdot dA_f}$$

——发展了普适性专用计算机软件（输入En、Z、A即可，En=0.5-160MeV）





- ★ 0.5-160MeV宽的中子能区计算结果和实验数据一致性好;
- ★ 新势驱动模型与其它模型 (GEF、TALY和PYF) 相比, 有更好的计算精度、更宽的中子能区普适性和核素普适性。



发射中子前裂变碎片质量分布计算数据与实验比较
——红色: 势驱动模型@兰州大学

2、裂变物理理论研究进展

2) 基于裂变驱动势的蒙特卡洛模拟方法

◆ 将模型植入Geant4程序，发展了M-C方法和模拟软件；

◆ 可实现多物理量模拟；

独立产额质量/电荷分布；
累计产额质量/电荷分布
动能分布（平均及总动能）
裂变中子谱
衰变 γ 谱分布

★ 普适性好；
★ 实验及库数据对比；
★ 显著好于其他程序。

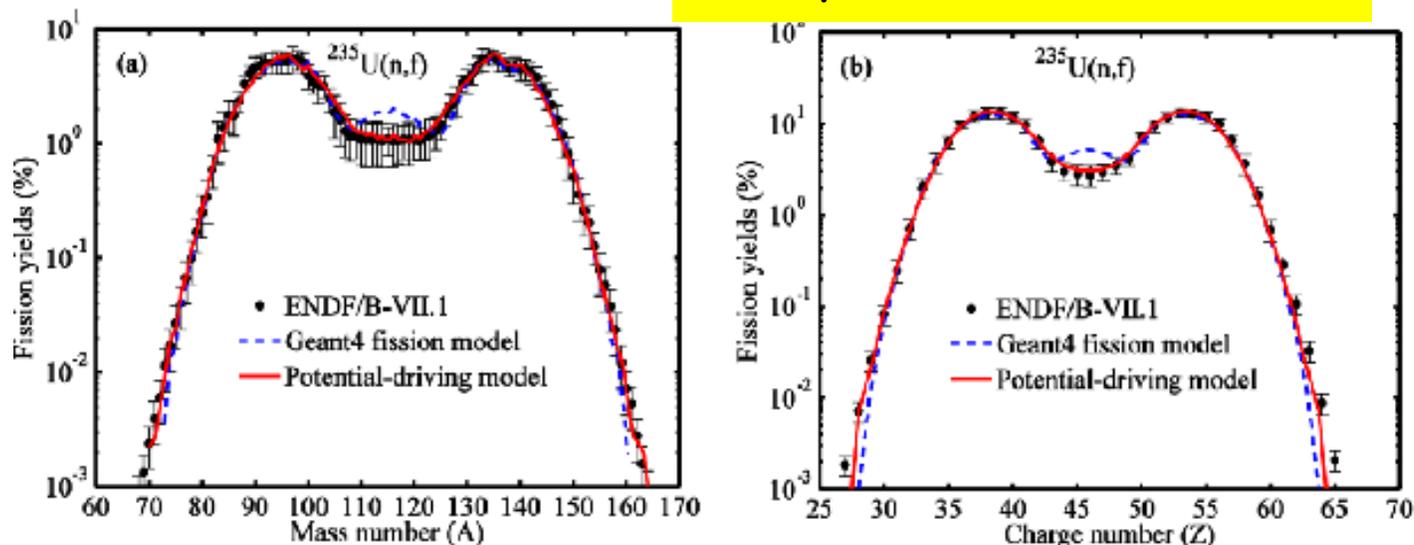
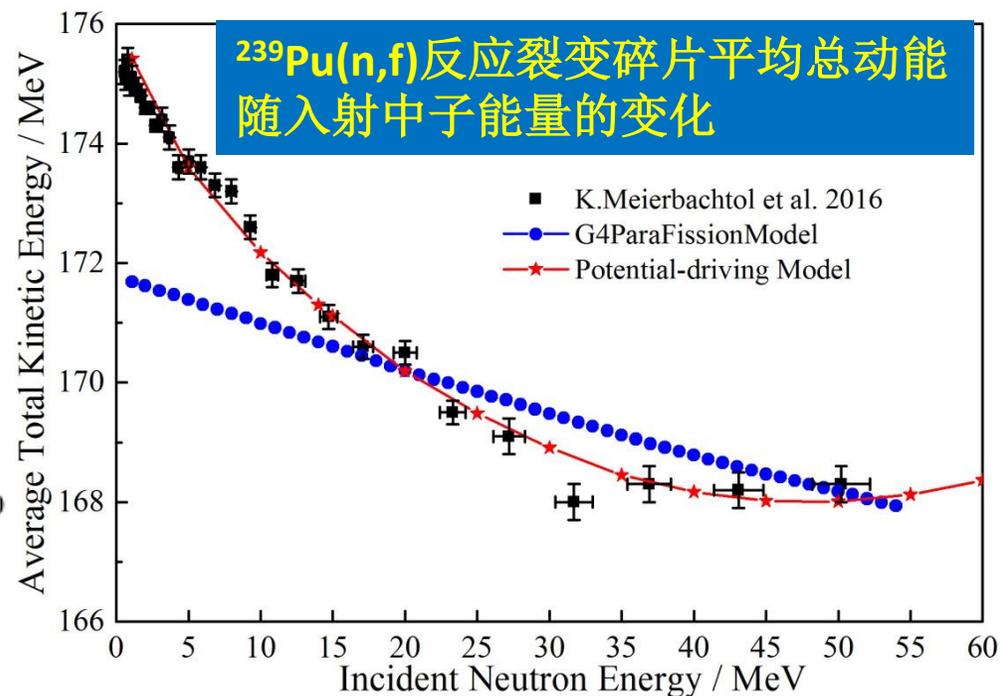


图2 14MeV快中子诱发 $^{235}\text{U}(n,f)$ 反应裂变碎片的独立产额分布。

(a) 独立产额质量数分布；(b) 独立产额电荷数分布



$^{239}\text{Pu}(n,f)$ 反应裂变碎片平均总动能
随入射中子能量的变化

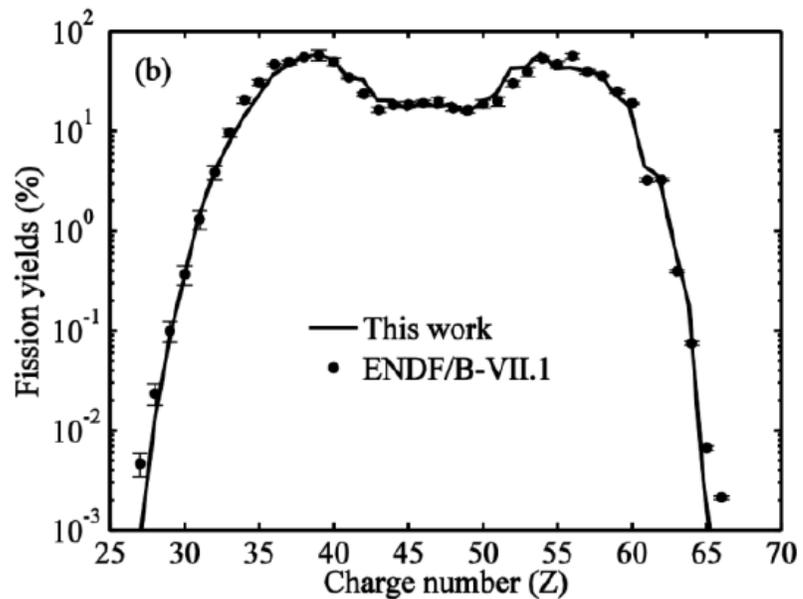
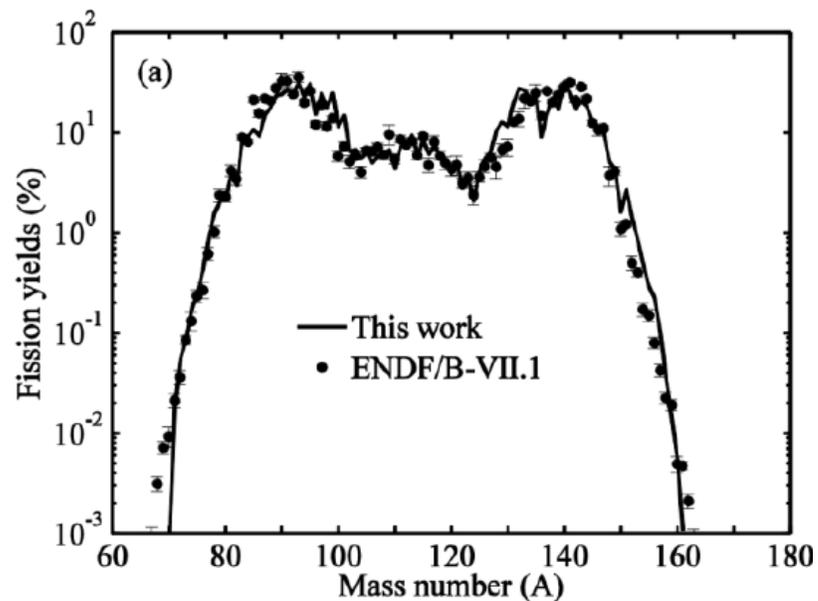


图 4-7 $^{232}\text{Th}(n,f)$ 反应裂变碎片的累积产额分布
 (a) 累积产额质量数分布; (b) 累积产额电荷数分布

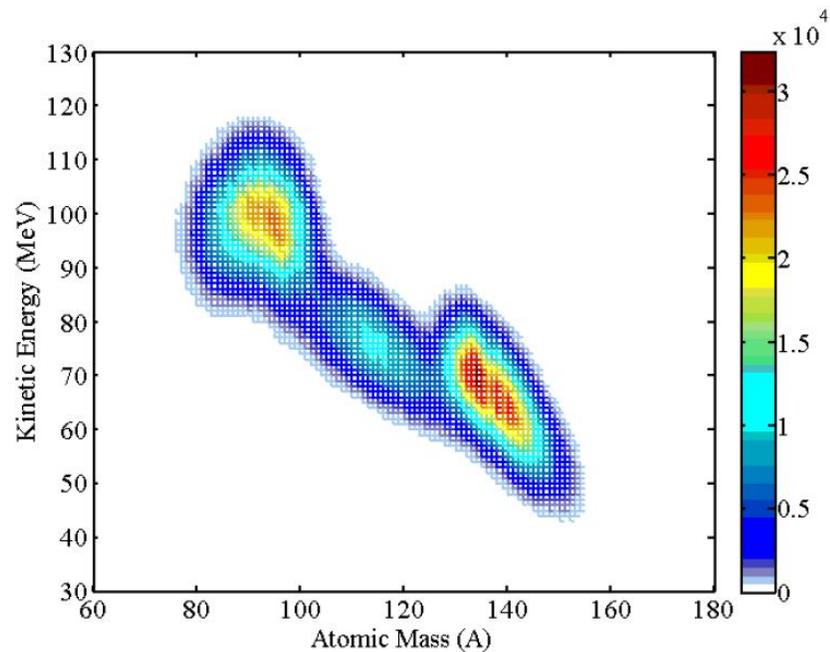


图 4-8 $^{232}\text{Th}(n,f)$ 反应裂变碎片动能分布

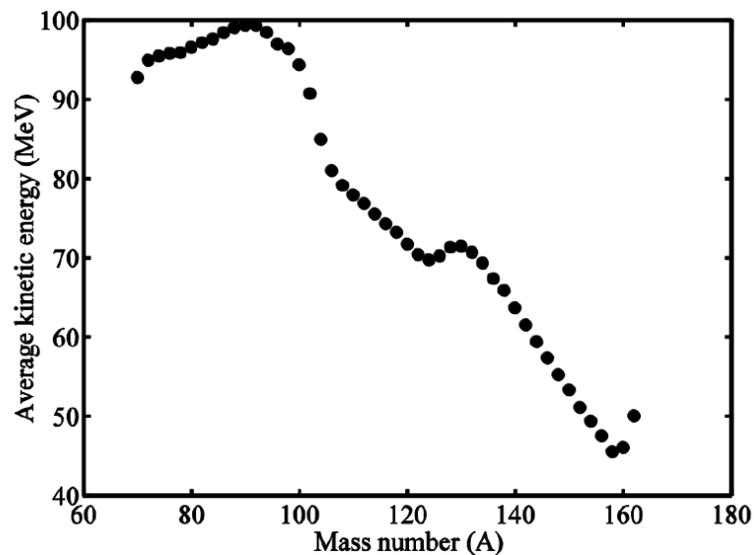


图 4-9 $^{232}\text{Th}(n,f)$ 反应裂变碎片平均动能随裂变碎片质量数变化

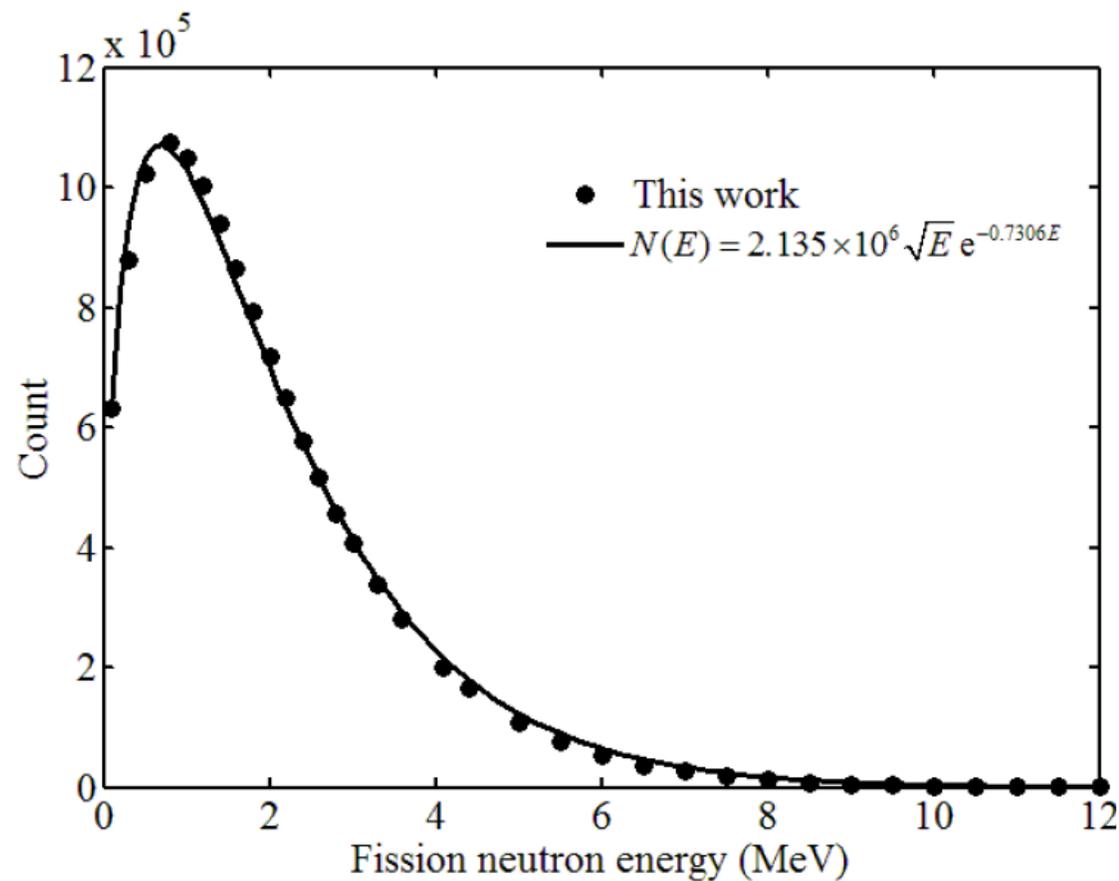


图 4-11 $^{232}\text{Th}(n,f)$ 反应裂变中子谱分布

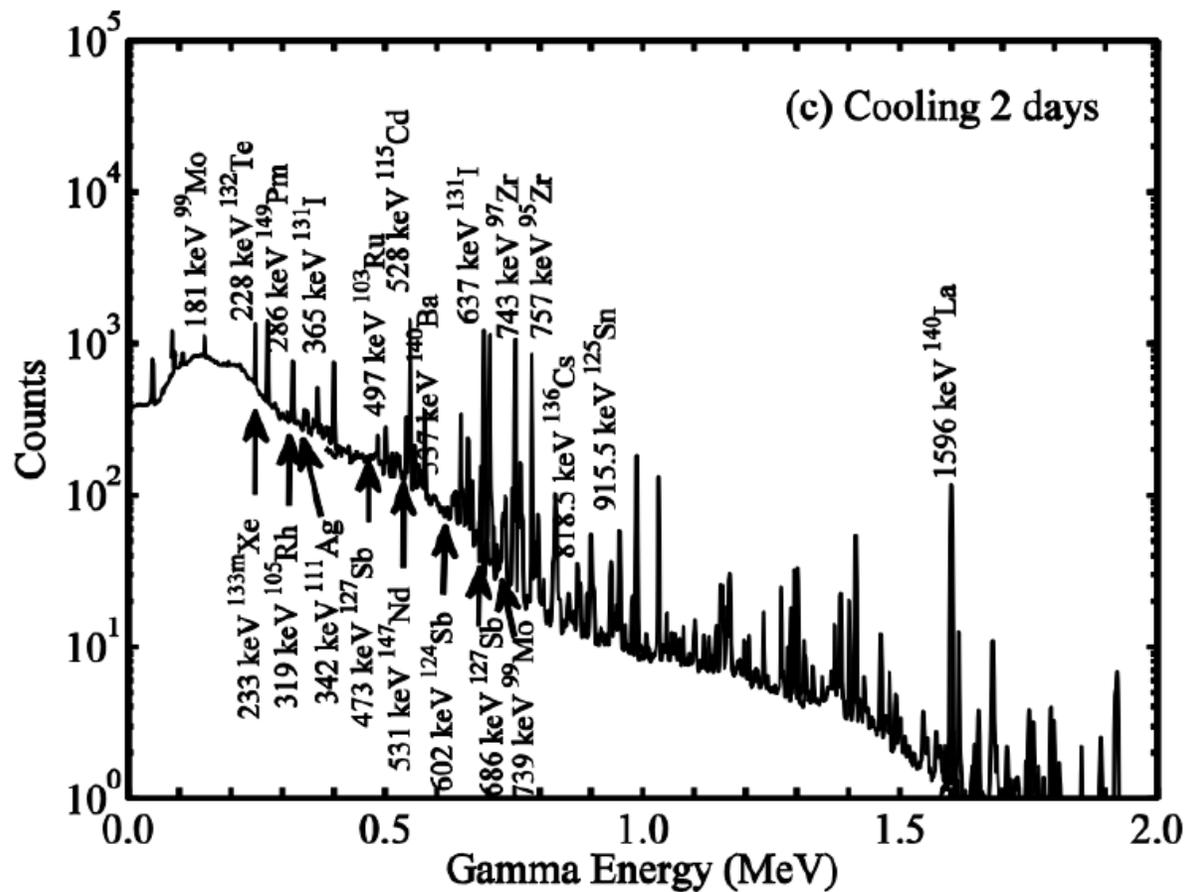


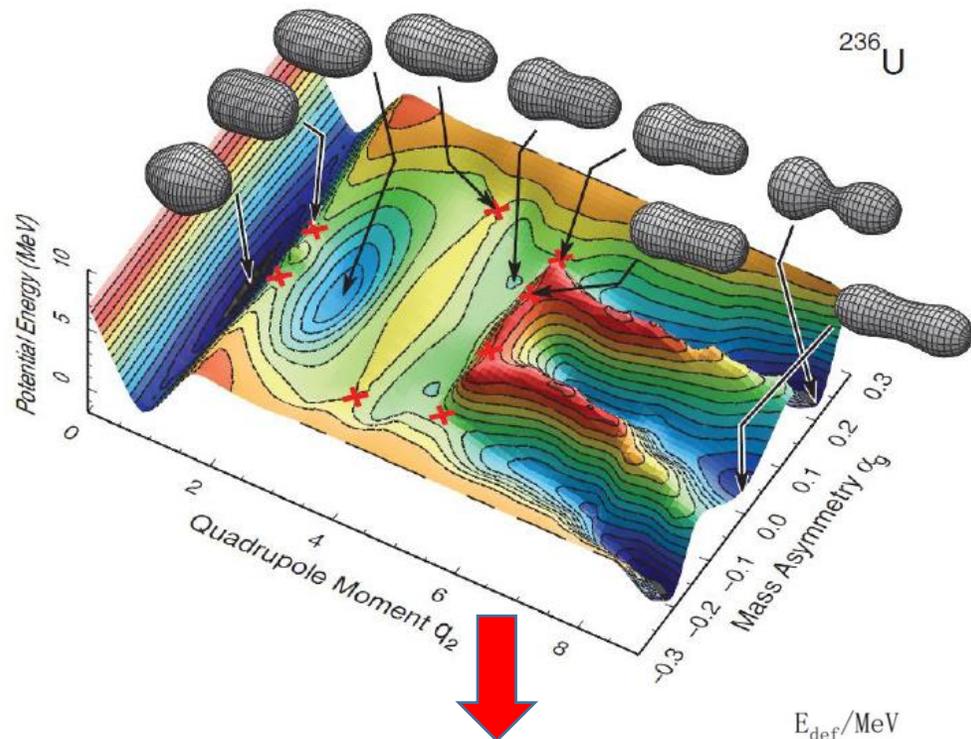
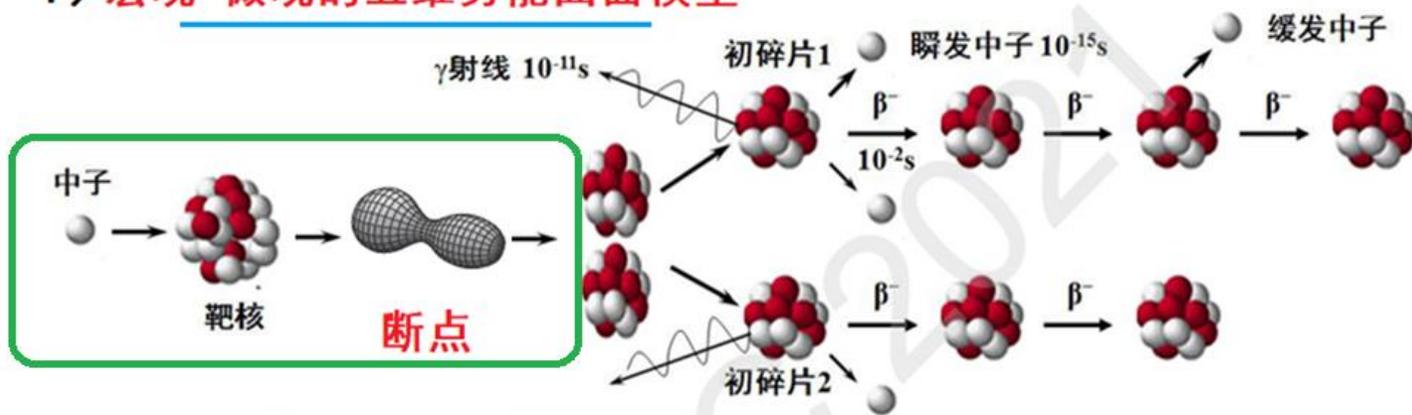
图 4-12 不同冷却时间的特征 γ 射线谱

2、裂变物理理论研究进展

3) 裂变动力学研究——基金重点项目

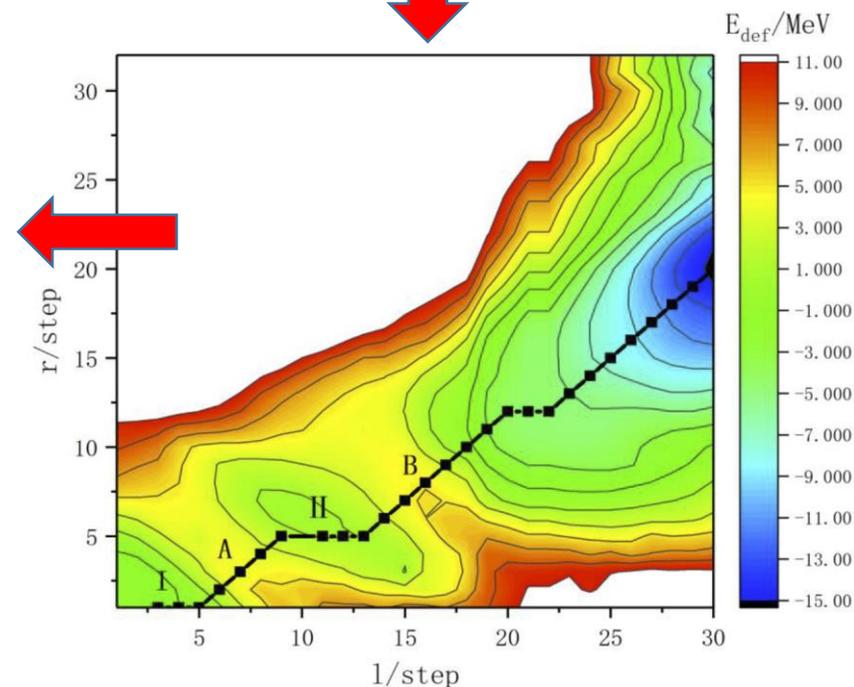
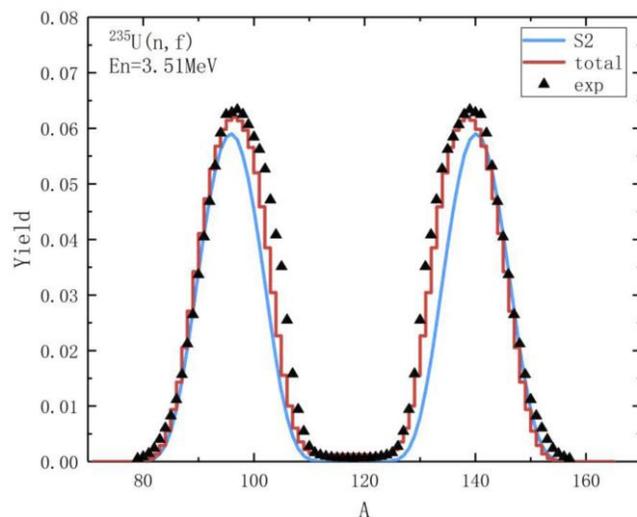
2) 唯象裂变驱动势Potential-driving模型

1) 宏观-微观的五维势能曲面模型



3) 时间依赖的双核统计模型

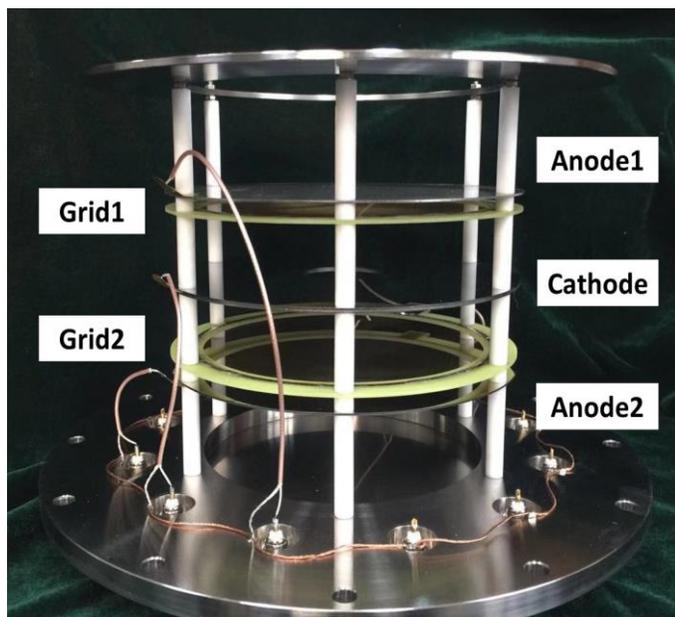
正在致力于此方面研究



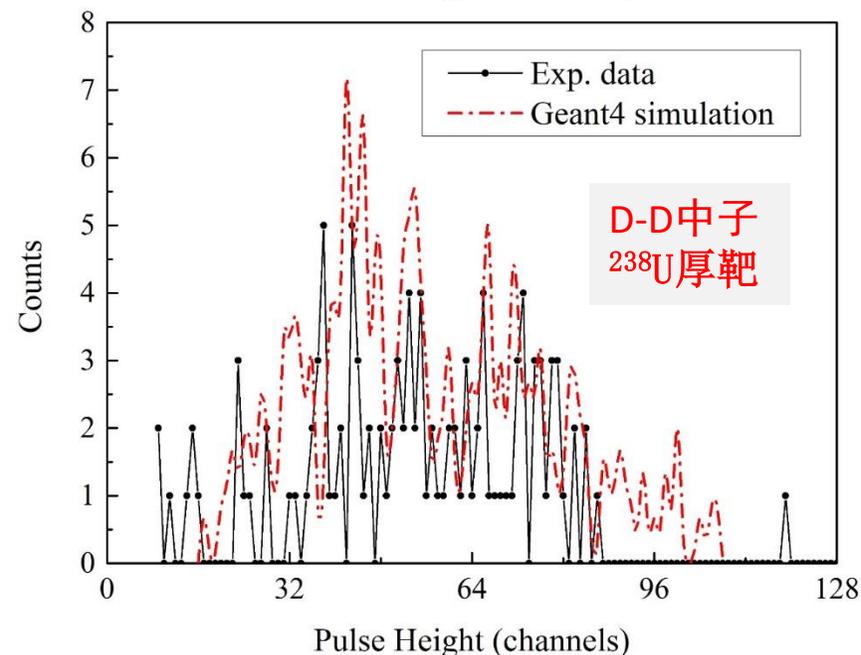
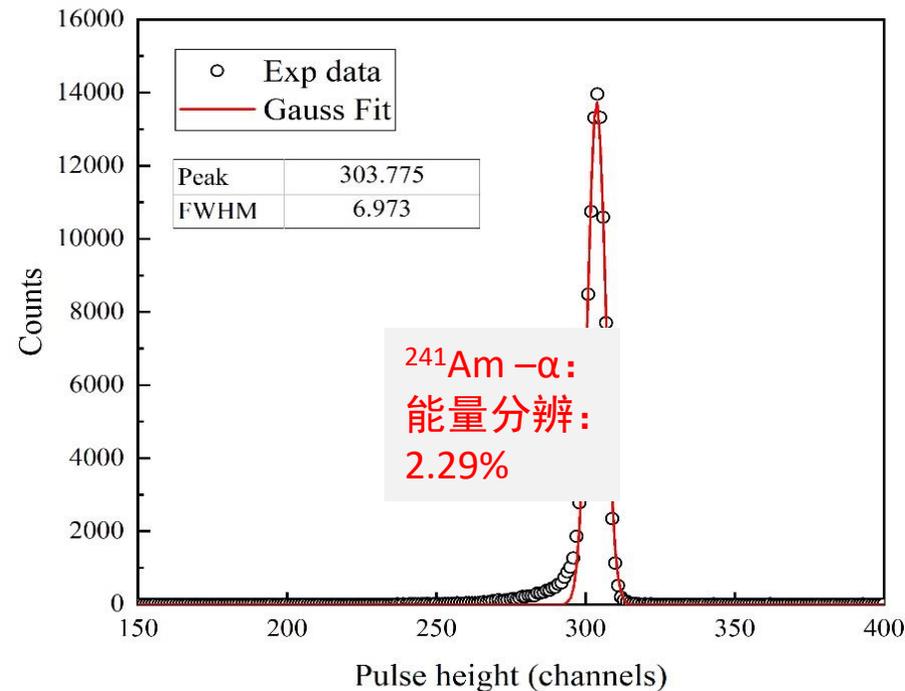
3、裂变物理实验研究进展——基金重点项目

1) 双屏栅电离室研究进展

- ◆设计和发展了电离室样机；
- ◆开展了能量分辨测试；
- ◆开展了裂变碎片初步测试；



——积累了有益经验；
——完成了数据处理方法研究；
——重点是制备²³²Th/²³⁸U薄靶；

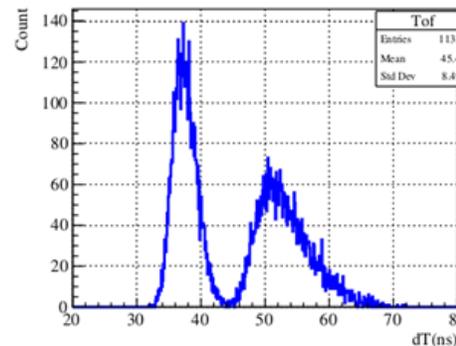


3、裂变物理实验研究进展

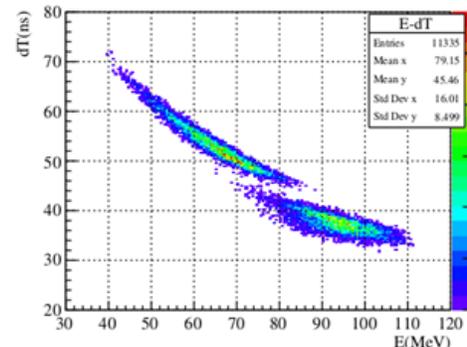
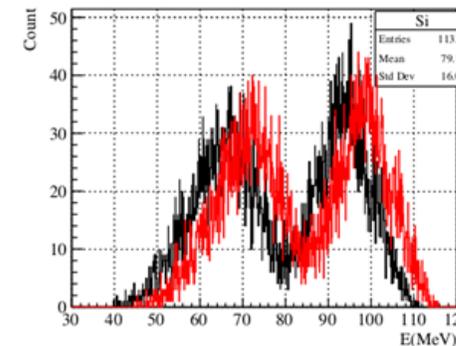
2) 正在发展粒子鉴别谱仪 (SPIDER)

- 开展了初步模拟和物理设计;
- 开展了初步信号仿真。

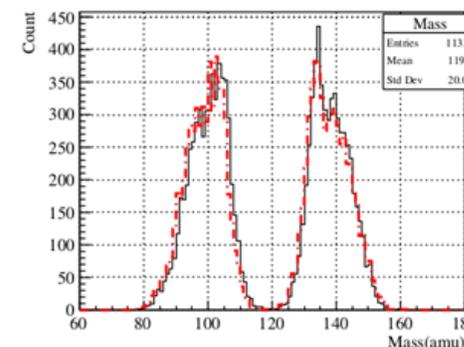
裂变碎片飞行时间分布



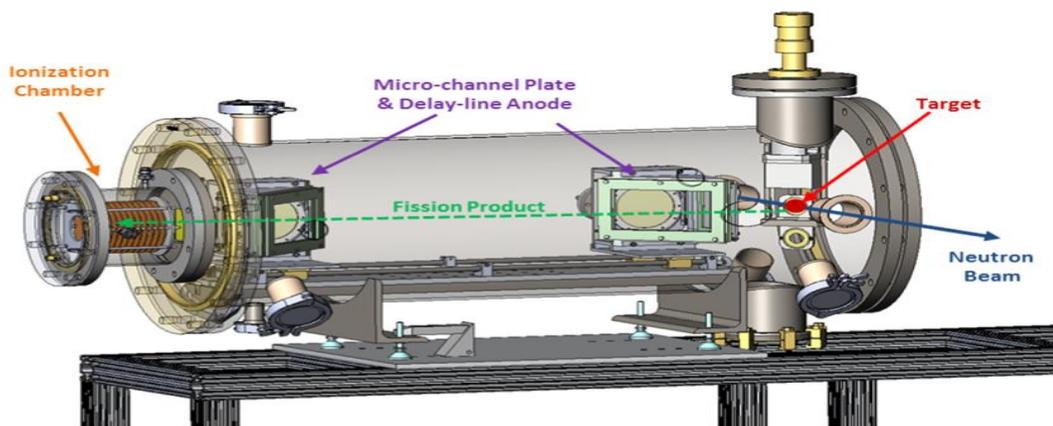
能量探测器能谱分布



能量-飞行时间二维幅度谱



裂变碎片质量分布



——根据仿真，有可行性；
——需重点研究
并应用于实验测量

报告内容

- 一、历史回顾
- 二、新一代强流中子发生器研制及应用
- 三、紧凑型中子发生器研制**
- 四、中子发生器中子辐射场研究
- 五、紧凑型中子发生器应用及展望
- 六、总结

三、紧凑型中子发生器研制

——2014年，启动紧凑型中子发生器研制项目

- ◆ 国家重大科学仪器开发专项（科技部）
- ◆ 中船重工第719研究所（横向协作）
- ◆ 中国科学院上海应用物理研究所（横向协作）

——最终用户：中广核苏州热工研究院

目标：为中子应用技术提供小型可控中子源

二、紧凑型中子发生器研制

1、结构与指标

★ 结构

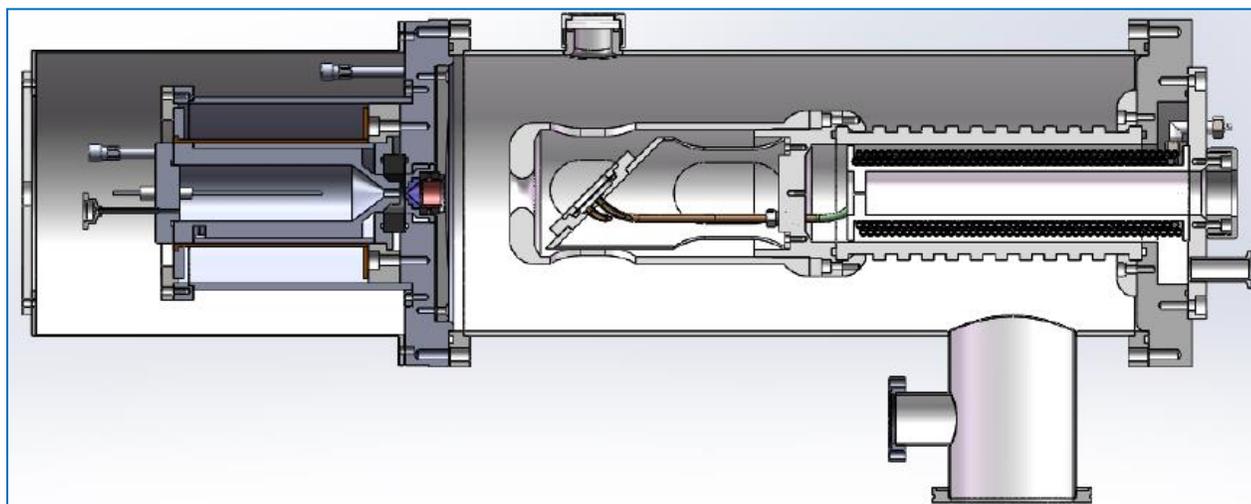
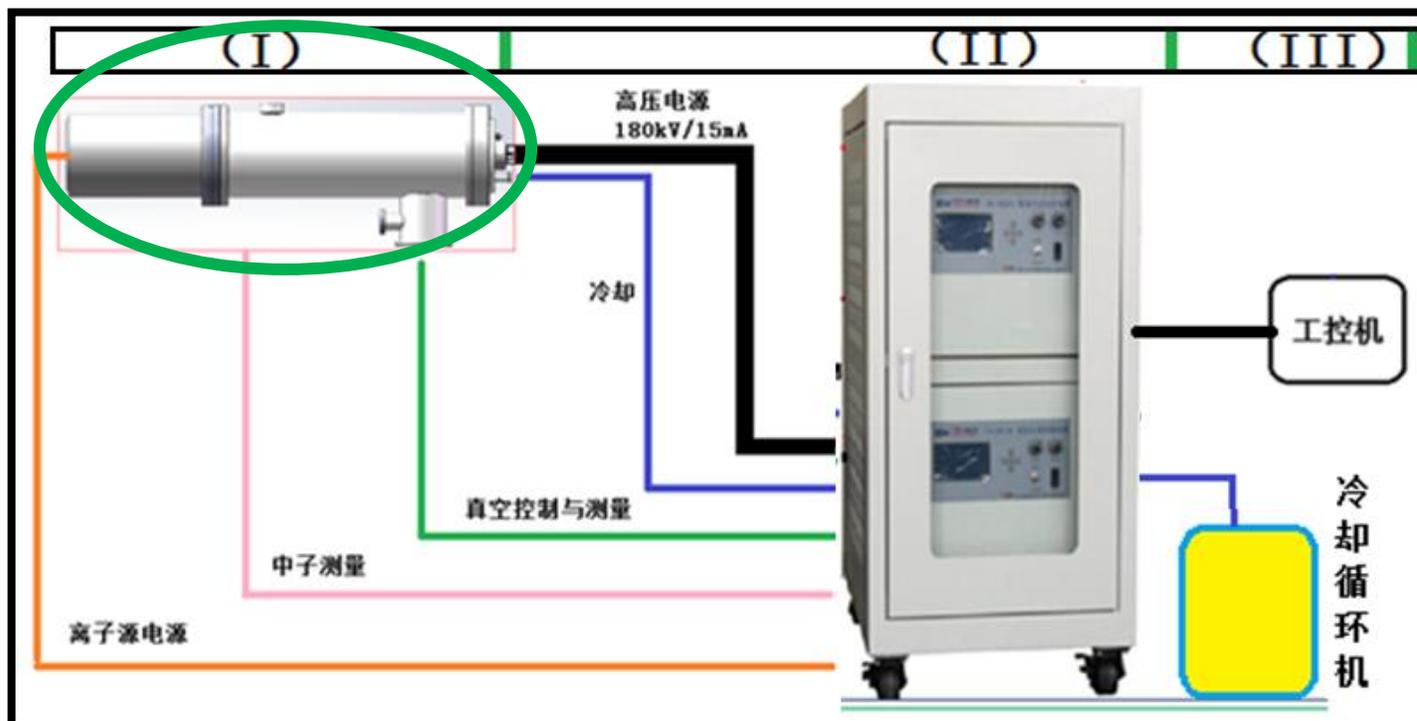
- ◆ 中子发生器主体(I);
- ◆ 电源及测量控制元件集成柜 (II);
- ◆ 工控机 (III)
- ◆ 冷却循环机

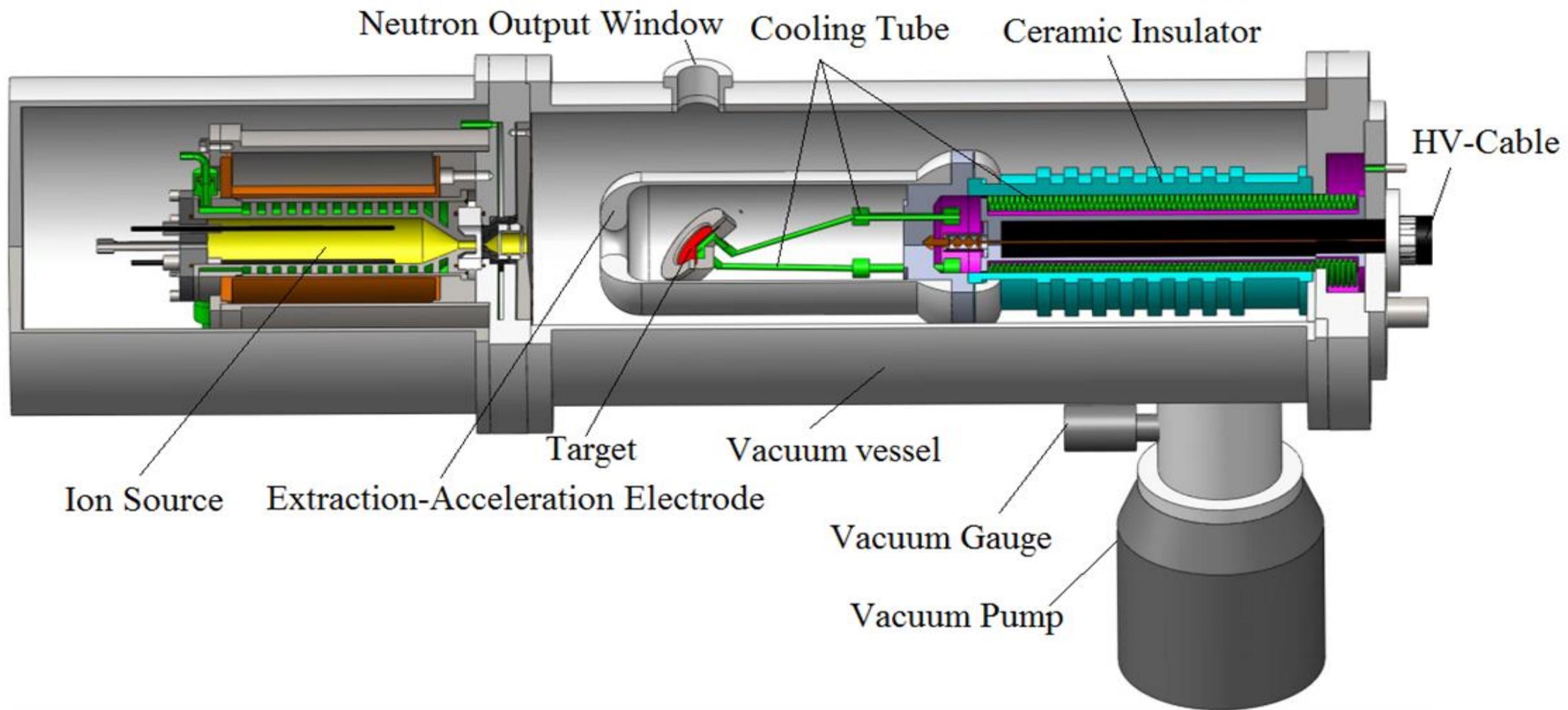
★ 技术指标

- ◆ D能量: 120-150keV;
- ◆ D束流强度: $> 1\text{mA}$;
- ◆ 中子产额: D-D: $> 1 \times 10^8 \text{ n/s}$
D-T: $> 1 \times 10^{10} \text{ n/s}$
- ◆ 尺寸: 长 $>100\text{cm}$, 直径 $>25\text{cm}$

★ 应用目标

- 代替同位素中子源;
- 产额高, 更安全。



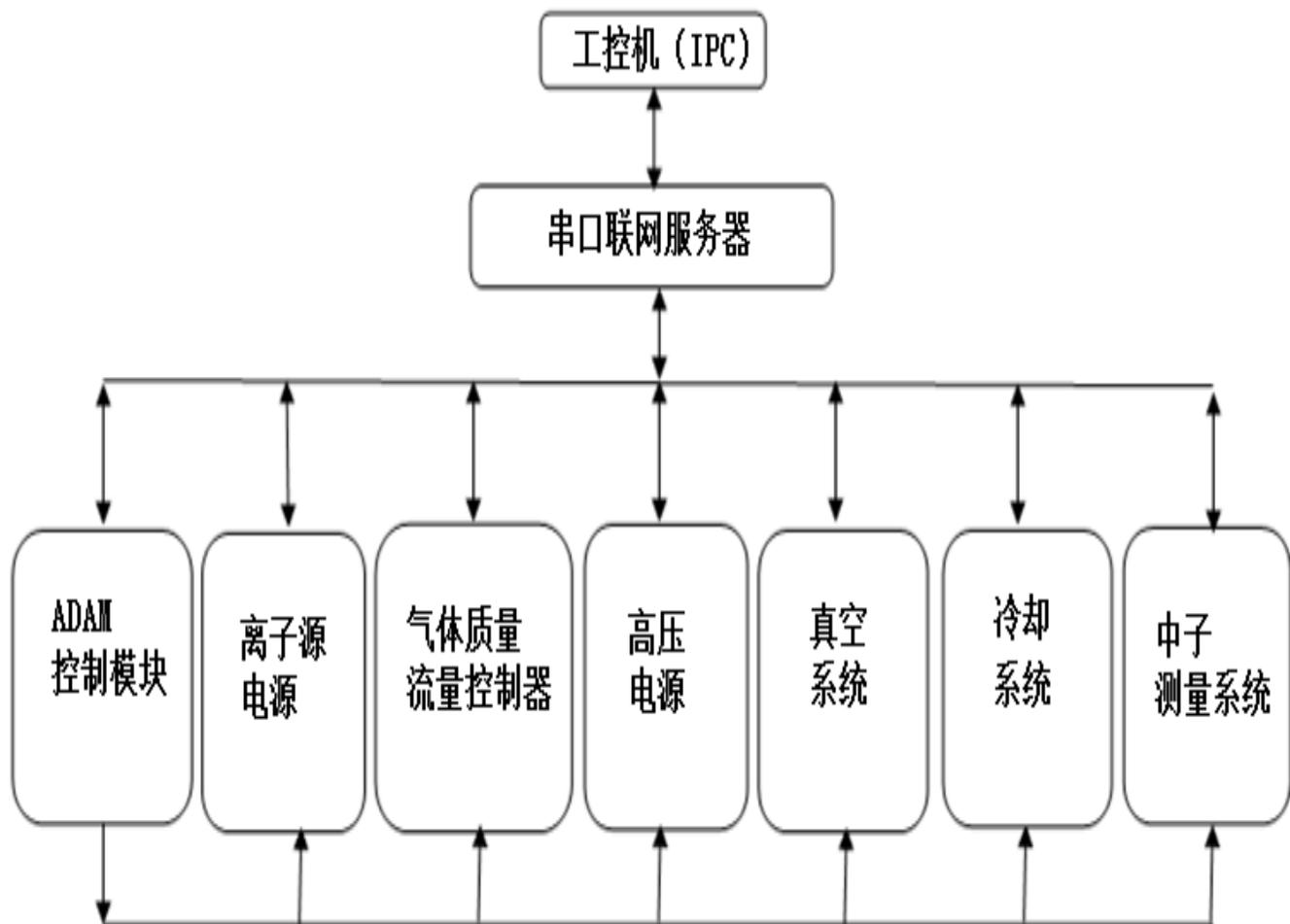
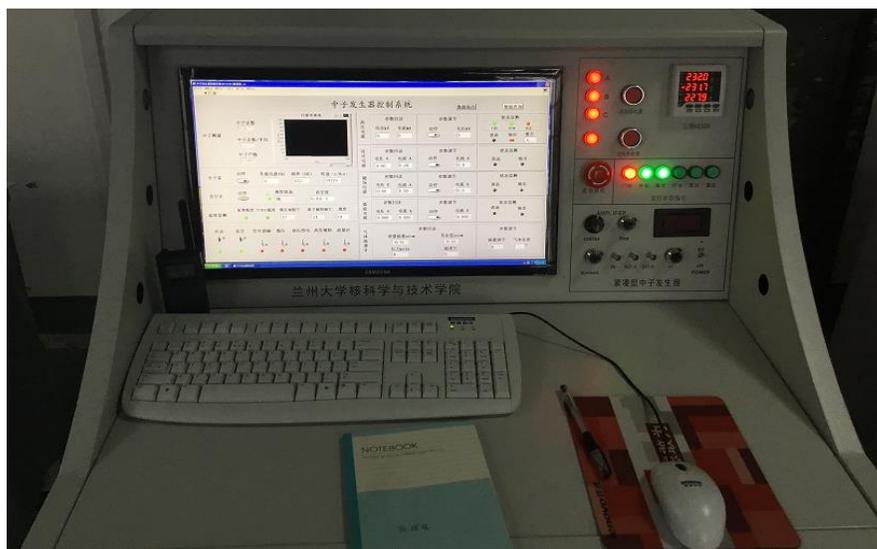


二、紧凑型中子发生器研制

2、简单易操作的控制系统

——控制系统简介

- ◆ 工控机通过串口设备联网服务器与各设备连接，实现控制与监测；
- ◆ 简单友好的控制界面
- ◆ 完备的数据库功能



中子发生器控制系统

数据保存

数据查询

计数率曲线

Plot 0

中子计数

983.00

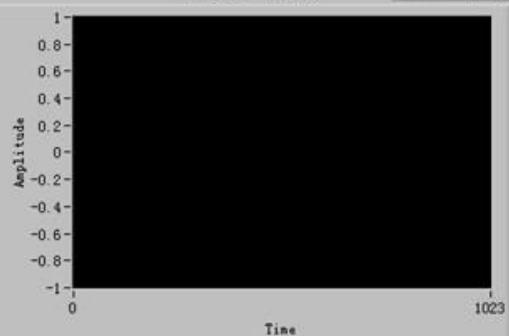
中子测量

中子计数/平均

983

中子产额

9.83E+2



高压电源

参数回读

电压kV

0

电流mA

0

参数调节

启停



电压kV

0

状态监测



门控



冷却



高压

通讯



输出



警告



无

灯丝电源

参数回读

电压 V

0.01

电流 A

0.00

参数调节

启停



电流 A

0.0

状态监测

通讯



输出



磁场电源

参数回读

电压 V

0.05

电流 A

0.00

参数调节

启停



电流 A

0.0

状态监测

通讯



输出



弧流电源

参数回读

电压 V

0.310

电流 A

0.000

参数调节

启停



电流 A

0.000

状态监测

通讯



输出



气体流量计

参数回读

质量流量sccm

0.31

设定值sccm

0

压力psia

11.78

温度℃

23.83

参数调节

流量调节

0

气体选择



分子泵

启停



负载电流(A)

0

频率(HZ)

0

转速(r/Min)

0.0000

真空计

启停



规管状态



ok

真空度

0E+0

温度监测

泵体温度



TC400温度



弧压电阻℃

0

离子源阳极℃

0

温度

0

冷却



真空



灯丝励磁



弧压



高压供电

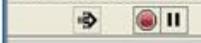


高压辅助



流量计





历史数据

完备的数据库功能

返回主界面

数据表格

records1

数据查询起始时间

11:46:00
2018-4-3

数据查询结束时间

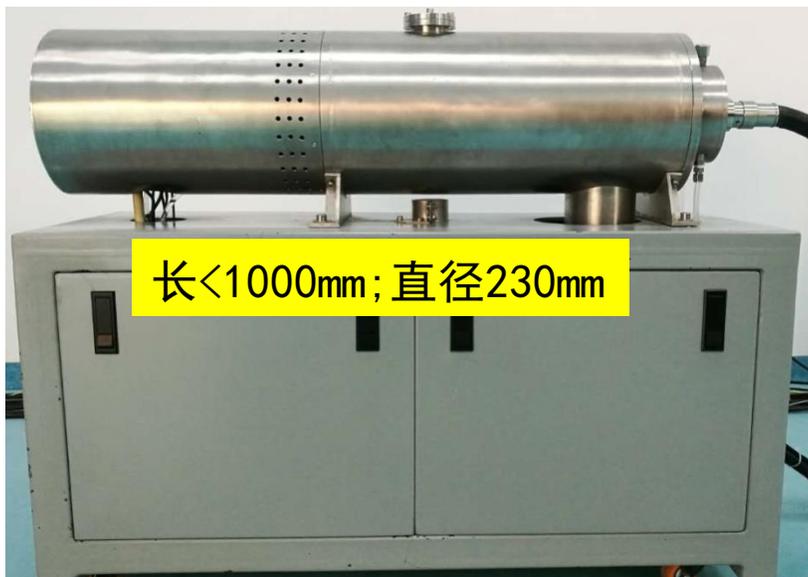
11:46:08
2018-7-24

确定

OK

时间	真空度(Pa)	进气量 (sccm)	灯丝电压(V)	灯丝电流(A)	励磁电压(V)	励磁电流(A)	弧流电压(V)	弧流电流(A)	引出高压(kV)	负载电流(mA)	中子产额(n/s)
2018-4-3 21:51:42	0.000772	0.4	19.462	36.015	9.06	5.002	148	0.799	120	2.4	1.14646E+07
2018-4-3 21:51:43	0.000771	0.4	19.458	36.014	9.06	5.002	148.17	0.8	120	2.4	1.17232E+07
2018-4-3 21:51:44	0.000772	0.4	19.462	36.015	9.06	5.002	148.45	0.8	120	2.4	1.18956E+07
2018-4-3 21:51:45	0.000771	0.4	19.469	36.015	9.06	5.002	148.45	0.8	120	2.4	1.21542E+07
2018-4-3 21:51:46	0.000769	0.4	19.603	36.015	9.06	5.002	148.3	0.8	120	2.4	1.25852E+07
2018-4-3 21:51:47	0.000769	0.4	19.585	36.015	9.06	5.002	148.78	0.799	120	2.4	1.27576E+07
2018-4-3 21:51:48	0.000767	0.4	19.58	36.015	9.06	5.002	148.78	0.8	120	2.4	1.28438E+07
2018-4-3 21:51:49	0.000768	0.4	19.581	36.015	9.06	5.002	148.95	0.8	120	2.4	1.28438E+07
2018-4-3 21:51:50	0.00077	0.4	19.581	36.015	9.07	5.002	149.09	0.799	120	2.4	1.27576E+07
2018-4-3 21:51:51	0.000769	0.4	19.579	36.015	9.07	5.002	149.17	0.8	120	2.4	1.25852E+07
2018-4-3 21:51:52	0.000771	0.4	19.579	36.015	9.07	5.002	149.17	0.8	120	2.4	1.27576E+07
2018-4-3 21:51:53	0.000767	0.4	19.582	36.015	9.07	5.002	149.19	0.8	120	2.4	1.27576E+07
2018-4-3 21:51:54	0.000766	0.4	19.584	36.015	9.07	5.002	149.32	0.8	120	2.4	1.28714E+07
2018-4-3 21:51:55	0.000767	0.4	19.596	36.015	9.07	5.002	149.32	0.799	120	2.4	1.28438E+07
2018-4-3 21:51:56	0.000767	0.4	19.508	36.015	9.06	5.002	149.23	0.799	120	2.4	1.293E+07
2018-4-3 21:51:57	0.000765	0.4	19.485	36.015	9.06	5.002	149.43	0.8	120	2.4	1.25852E+07
2018-4-3 21:51:58	0.000766	0.4	19.627	36.015	9.07	5.002	149.87	0.8	120	2.4	1.28714E+07
2018-4-3 21:51:59	0.000767	0.4	19.617	36.014	9.06	5.002	149.87	0.8	120	2.4	1.30162E+07
2018-4-3 21:52:00	0.000765	0.4	19.622	36.015	9.06	5.002	149.83	0.8	120	2.4	1.3361E+07
2018-4-3 21:52:01	0.000762	0.4	19.622	36.015	9.07	5.002	149.99	0.8	120	2.4	1.3792E+07
2018-4-3 21:52:02	0.000764	0.4	19.598	36.014	9.07	5.002	149.99	0.8	120	2.4	1.3792E+07
2018-4-3 21:52:03	0.000762	0.4	19.608	36.014	9.07	5.002	150.29	0.8	120	2.4	1.3792E+07
2018-4-3 21:52:04	0.000762	0.4	19.592	36.015	9.07	5.002	150.35	0.8	120	2.4	1.38782E+07
2018-4-3 21:52:05	0.000762	0.4	19.599	36.015	9.07	5.002	150.37	0.8	120	2.4	1.41368E+07
2018-4-3 21:52:06	0.000761	0.4	19.603	36.015	9.06	5.002	150.37	0.8	120	2.4	1.40506E+07
2018-4-3 21:52:07	0.000763	0.4	19.614	36.015	9.07	5.002	150.45	0.8	120	2.4	1.4654E+07
2018-4-3 21:52:08	0.000759	0.4	19.474	36.015	9.07	5.002	150.52	0.8	120	2.4	1.48264E+07
2018-4-3 21:52:09	0.00076	0.4	19.534	36.015	9.07	5.002	150.52	0.8	120	2.5	1.47402E+07
2018-4-3 21:52:10	0.000761	0.4	19.488	36.016	9.07	5.002	150.67	0.8	120	2.5	1.48264E+07
2018-4-3 21:52:11	0.000759	0.4	19.614	36.015	9.07	5.002	150.9	0.8	120	2.5	1.51712E+07
2018-4-3 21:52:12	0.000763	0.4	19.614	36.015	9.07	5.002	150.95	0.8	120	2.5	1.52574E+07
2018-4-3 21:52:13	0.000766	0.4	19.615	36.015	9.07	5.002	150.95	0.8	120	2.5	1.56022E+07
2018-4-3 21:52:14	0.000756	0.4	19.617	36.015	9.07	5.002	150.97	0.8	120	2.5	1.58608E+07
2018-4-3 21:52:15	0.000757	0.4	19.62	36.015	9.07	5.002	151.24	0.8	120	2.5	1.5947E+07
2018-4-3 21:52:16	0.00076	0.4	19.624	36.015	9.07	5.002	151.24	0.8	120	2.5	1.60332E+07
2018-4-3 21:52:17	0.000758	0.4	19.559	36.013	9.07	5.002	151.21	0.8	120	2.5	1.62918E+07
2018-4-3 21:52:18	0.000757	0.4	19.598	36.015	9.07	5.002	151.37	0.8	120	2.5	1.64642E+07
2018-4-3 21:52:19	0.000758	0.4	19.534	36.014	9.07	5.002	151.4	0.8	120	2.5	1.69814E+07
2018-4-3 21:52:20	0.000759	0.4	19.639	36.015	9.07	5.002	151.4	0.8	120	2.5	1.70676E+07
2018-4-3 21:52:21	0.000759	0.4	19.696	36.015	9.07	5.002	151.67	0.8	120	2.5	1.71538E+07
2018-4-3 21:52:22	0.000757	0.4	19.67	36.015	9.07	5.002	151.96	0.799	120	2.5	1.724E+07
2018-4-3 21:52:23	0.000759	0.4	19.67	36.015	9.07	5.002	151.96	0.8	120	2.5	1.70676E+07
2018-4-3 21:52:24	0.000759	0.4	19.534	36.015	9.07	5.002	151.55	0.8	120	2.5	1.71538E+07
2018-4-3 21:52:25	0.000759	0.4	19.651	36.015	9.07	5.002	151.86	0.8	120	2.5	1.74124E+07
2018-4-3 21:52:26	0.000759	0.4	19.547	36.015	9.06	5.002	151.66	0.8	120	2.5	1.724E+07
2018-4-3 21:52:27	0.000758	0.4	19.543	36.015	9.06	5.002	151.66	0.8	120	2.5	1.74986E+07
2018-4-3 21:52:28	0.000756	0.4	19.541	36.015	9.06	5.002	151.92	0.8	120	2.5	1.75848E+07
2018-4-3 21:52:29	0.000755	0.4	19.637	36.015	9.06	5.002	152.3	0.8	120	2.5	1.79296E+07
2018-4-3 21:52:30	0.000756	0.4	19.656	36.015	9.06	5.003	152.3	0.799	120	2.5	1.81882E+07
2018-4-3 21:52:31	0.000752	0.4	19.654	36.015	9.06	5.002	152.43	0.799	120	2.5	1.8102E+07

紧凑型中子发生器主体



电源及控制集成柜



控制台

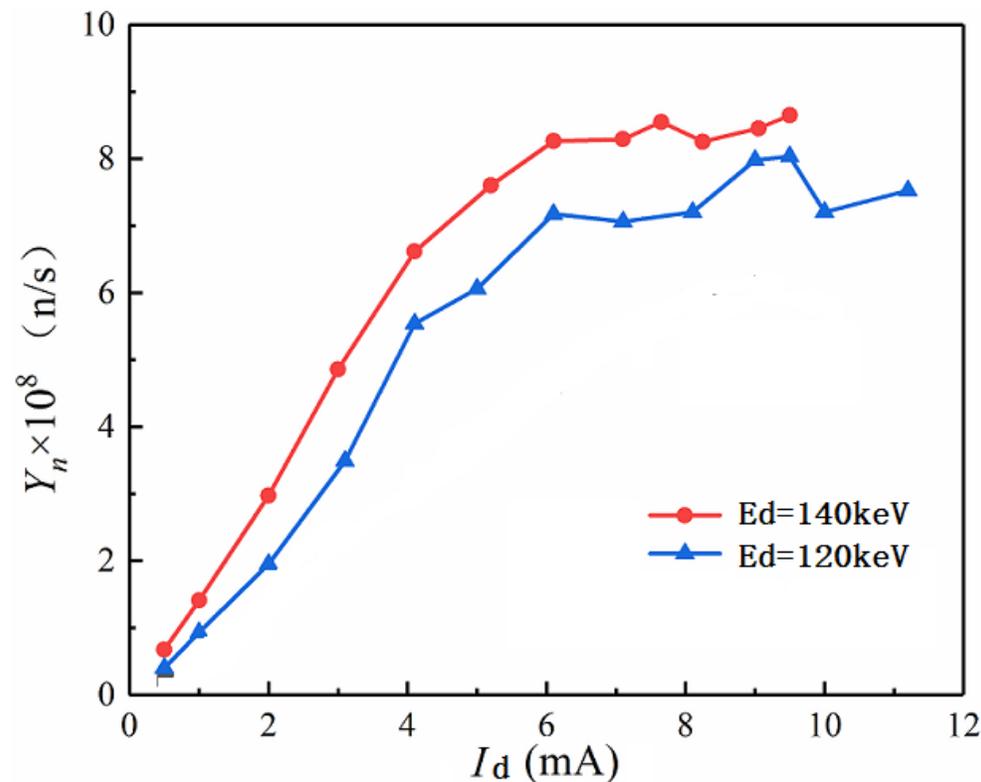
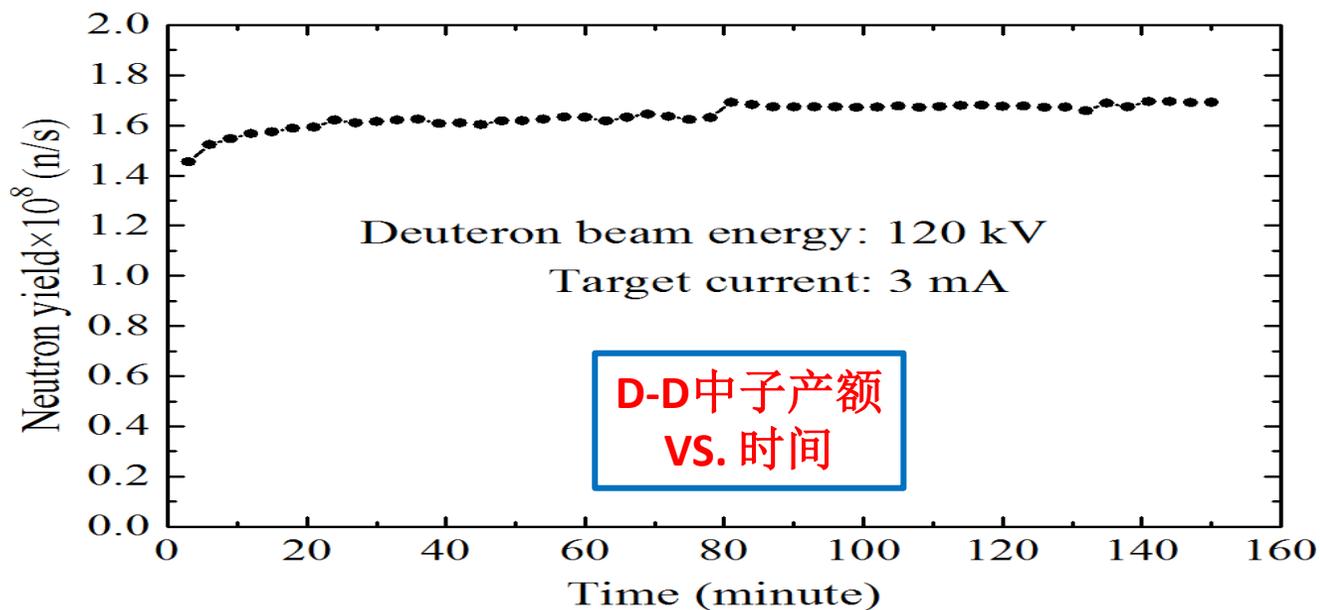


二、中子发生器研制

3、紧凑型中子发生器升级进展

——目前达到的指标

- ◆ 完成4台研制；
- ◆ D-D采用自注入靶，寿命长(>8000小时)；
- ◆ D-D中子产额达到预期指标： $>5 \times 10^8$ n/s
- ◆ 具备D-T中子产额大于 10^{10} n/s的潜力



D-D中子产额大于
 10^9 n/s可行!

二、紧凑型中子发生器研制

3、紧凑型中子发生器升级研究进展

——升级目标

★ 技术指标

◆ D-D产额 $>10^9$ n/s

◆ D-T产额 $>10^{11}$ n/s

★ 技术路线

◆ 先进的内置天线RF离子源技术；

——提高D束流单原子离子比；

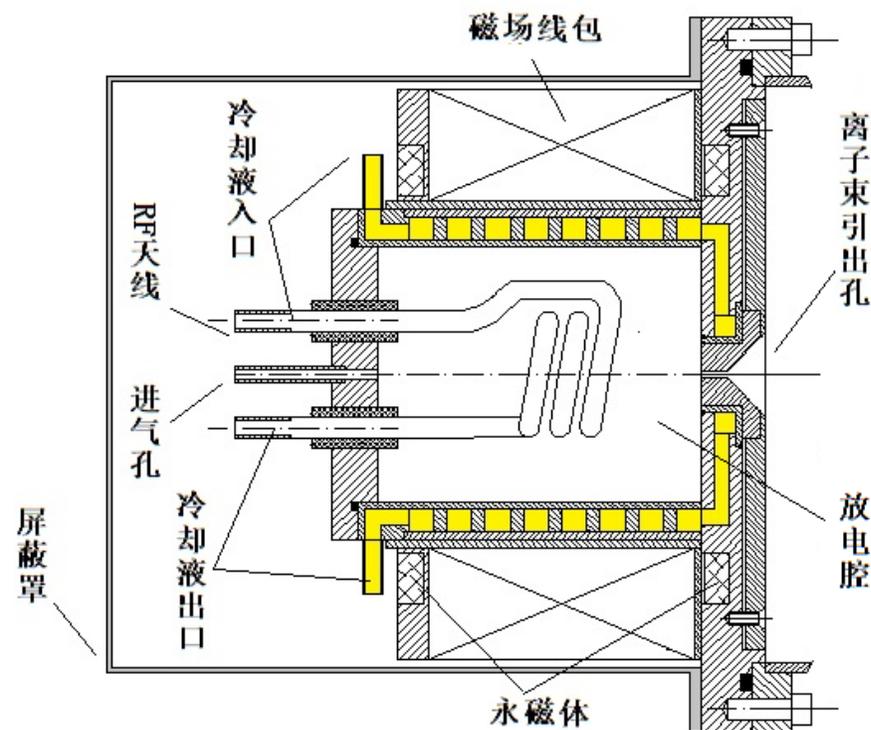
混合束： D_1^+ , D_2^+ , D_3^+

——提高单位D束流的中子比产额

◆ 靶系统优化

——良好的冷却（材料，冷却结构），
靶上束流由500W提高到大于1000W

◆ D束流能量提高到 >200 keV



内置天线RF离子源初步设计方案

——国家自然科学基金资助项目

——已安装完成，高压锻炼已达220kV

汇报内容

- 一、历史回顾
- 二、新一代强流中子发生器研制及应用
- 三、紧凑型中子发生器研制
- 四、中子发生器中子辐射场研究**
- 五、紧凑型中子发生器应用及展望
- 六、总结

四、中子发生器中子辐射场研究

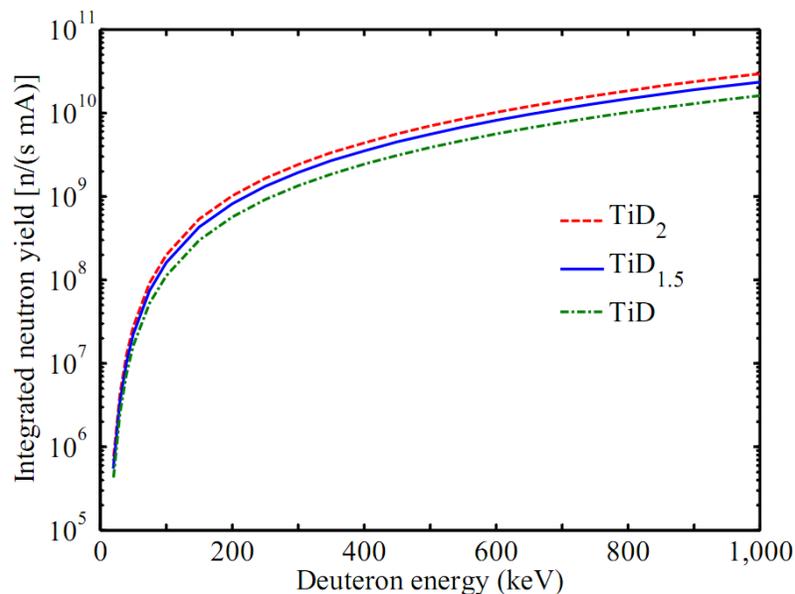
1、中子产额、能谱、角分布计算

◆ D-D反应中子源



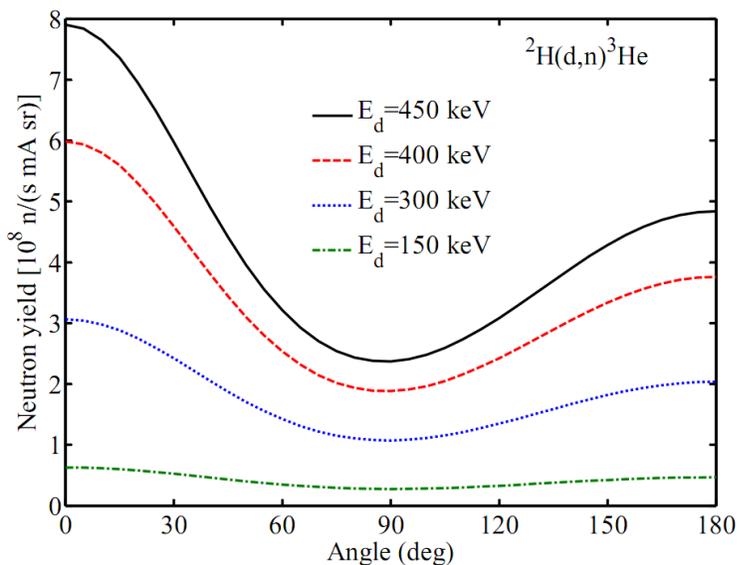
1) 中子产额

$$Y(E_{dl}) = \int_0^{E_{dl}} I_0 N_d \sigma(E_d) \frac{1}{S(E_d)} dE_d$$



2) 中子角分布

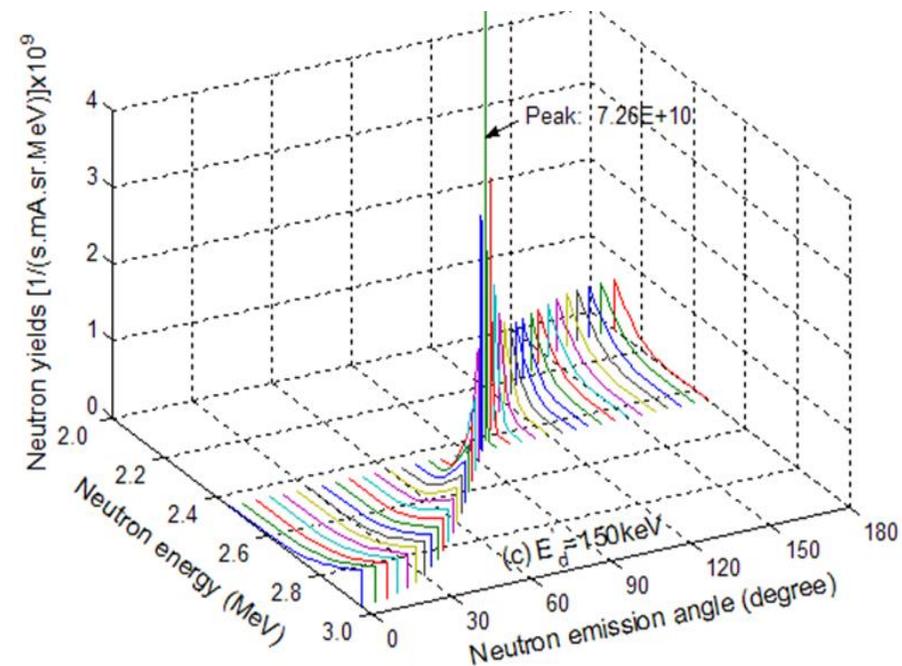
$$\frac{dY}{d\Omega}(\theta) = \sum_j \frac{dY_j}{d\Omega}(\theta, E_{d,j})$$



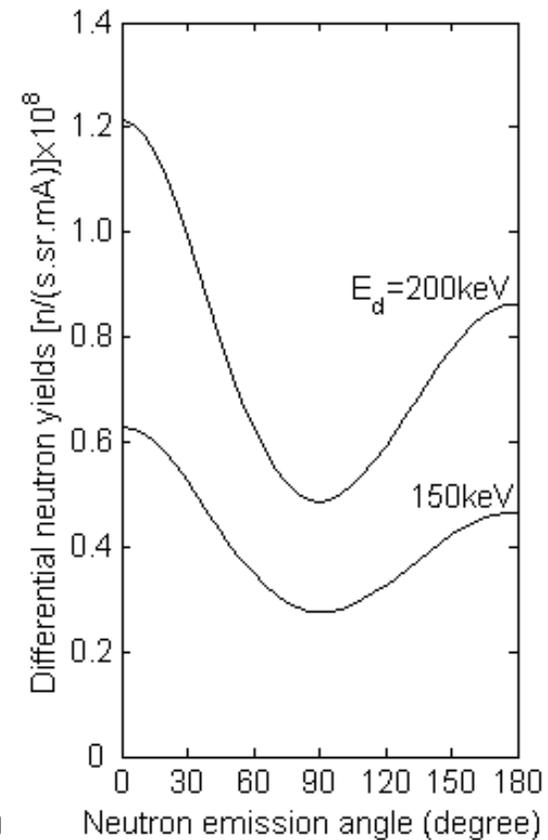
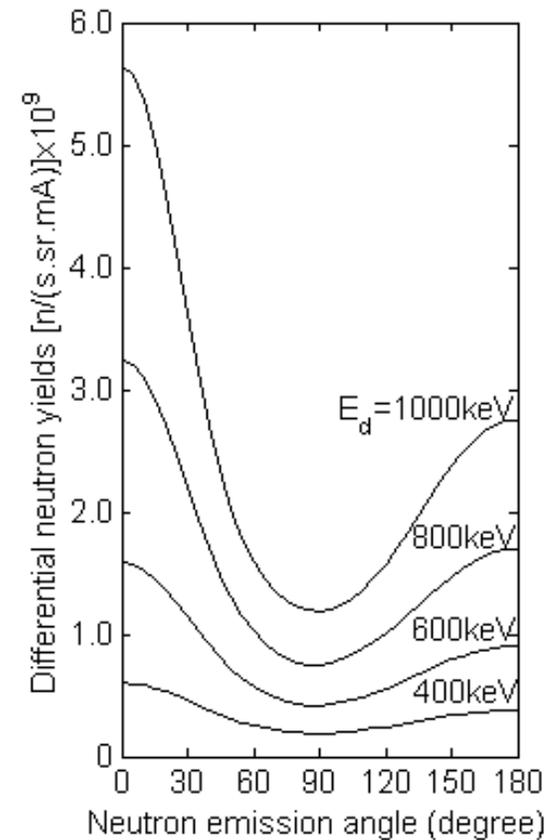
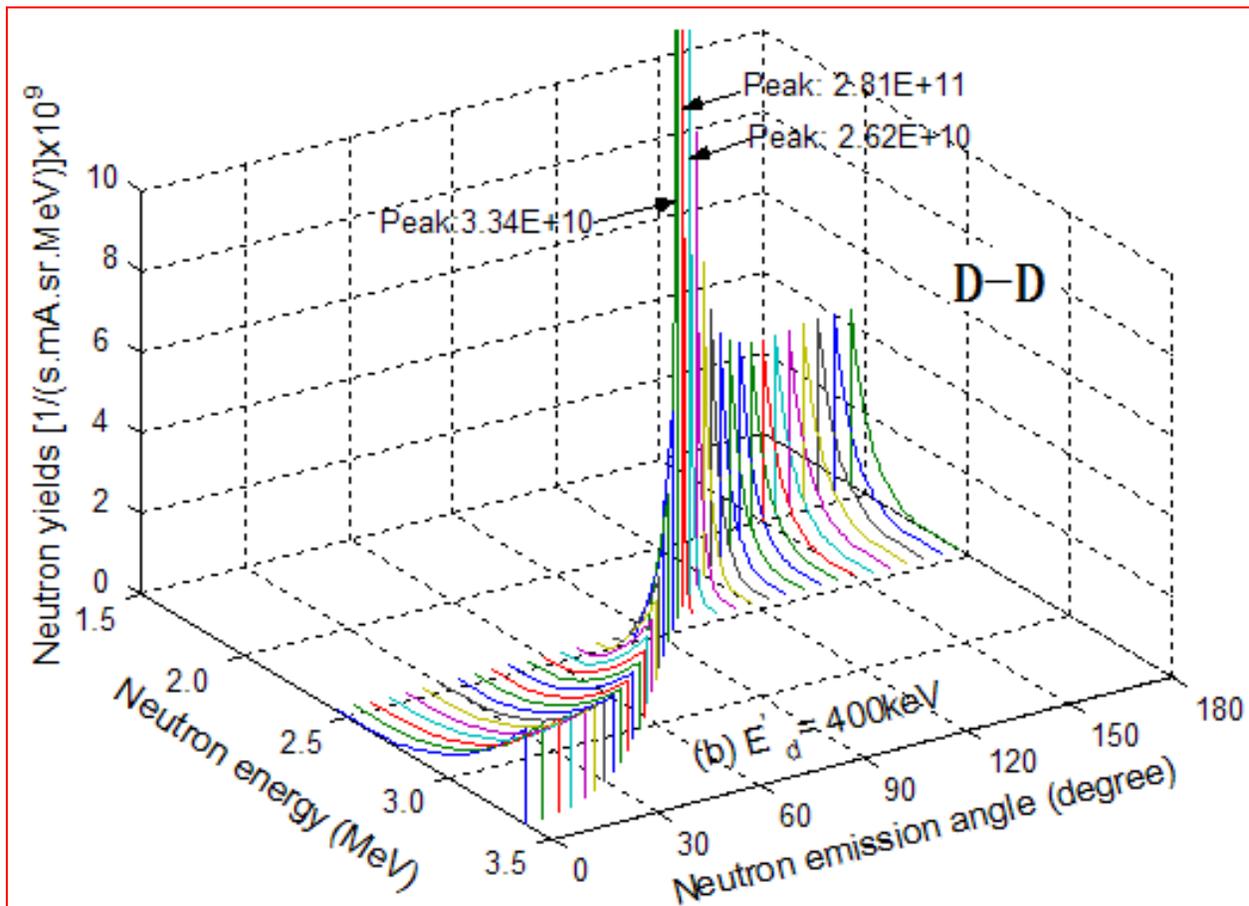
3) 中子能谱

$$\frac{dY_j}{d\Omega dE_n}(\theta, E_{n,j}) = \frac{\frac{dY_j}{d\Omega}(\theta, E_{d,j})}{\Delta E_{n,j}}$$

$$E_n(\theta, E_d) = \left\{ \frac{\sqrt{2E_d}}{4} \cos\theta + \left[\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{8} \cos^2\theta \right) E_d + \frac{3}{4} Q \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2$$



发展了专用计算软件dDTdyET)



三、中子发生器中子辐射场研究

1、中子产额、能谱、角分布计算

◆ D-T反应中子源



1) 中子产额

$$Y(E_{dl}) = \int_0^{E_{dl}} I_0 N_d \sigma(E_d) \frac{1}{S(E_d)} dE_d$$

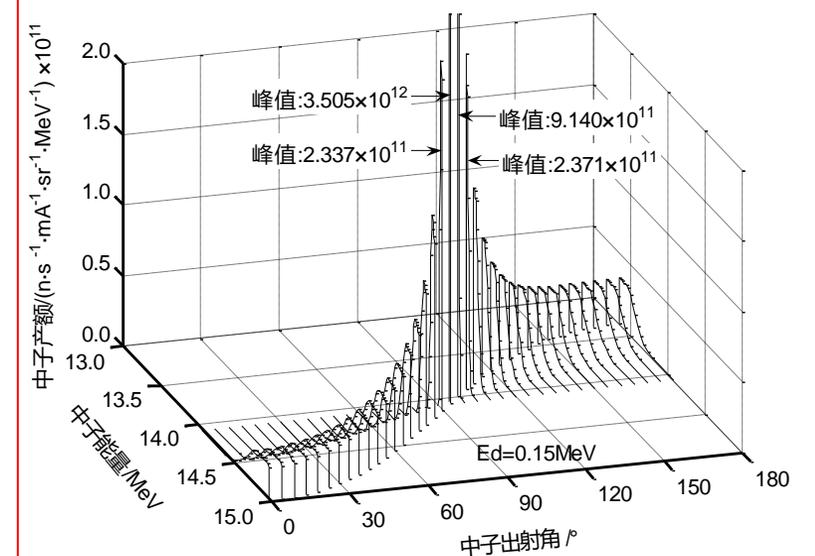
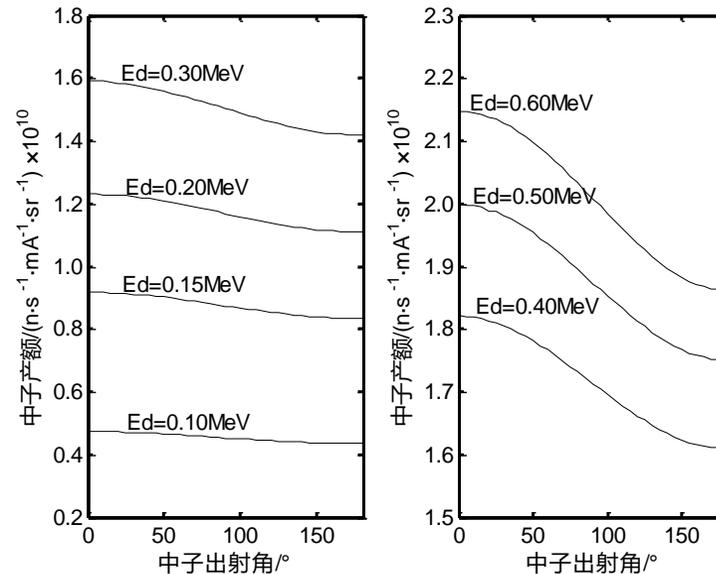
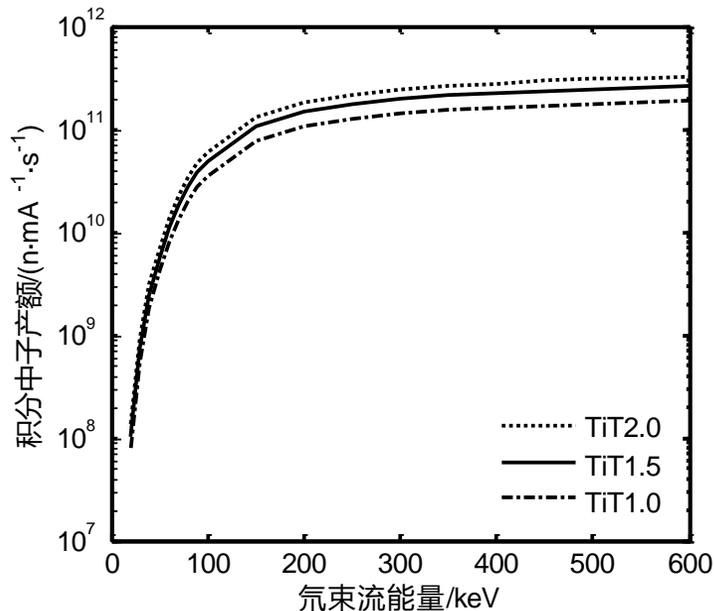
2) 中子角分布

$$\frac{dY}{d\Omega}(\theta) = \sum_j \frac{dY_j}{d\Omega}(\theta, E_{d,j})$$

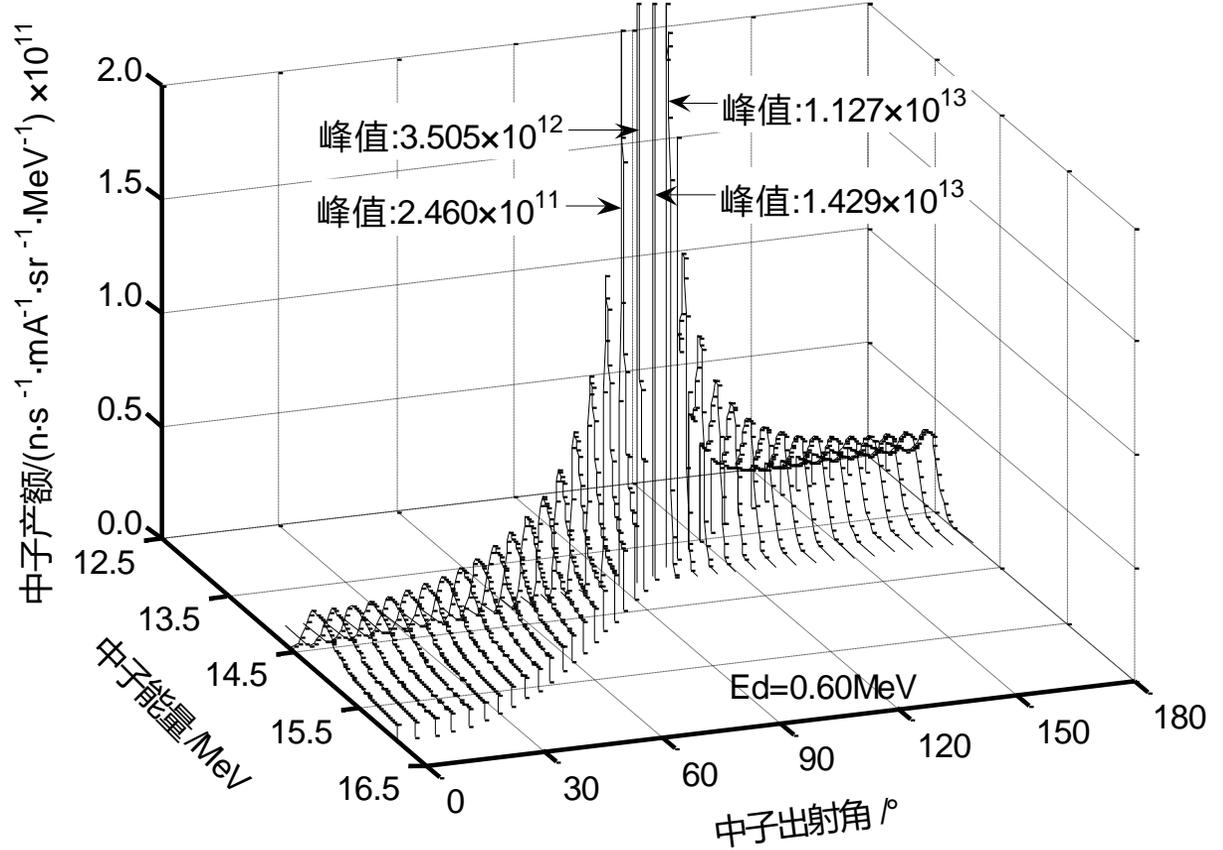
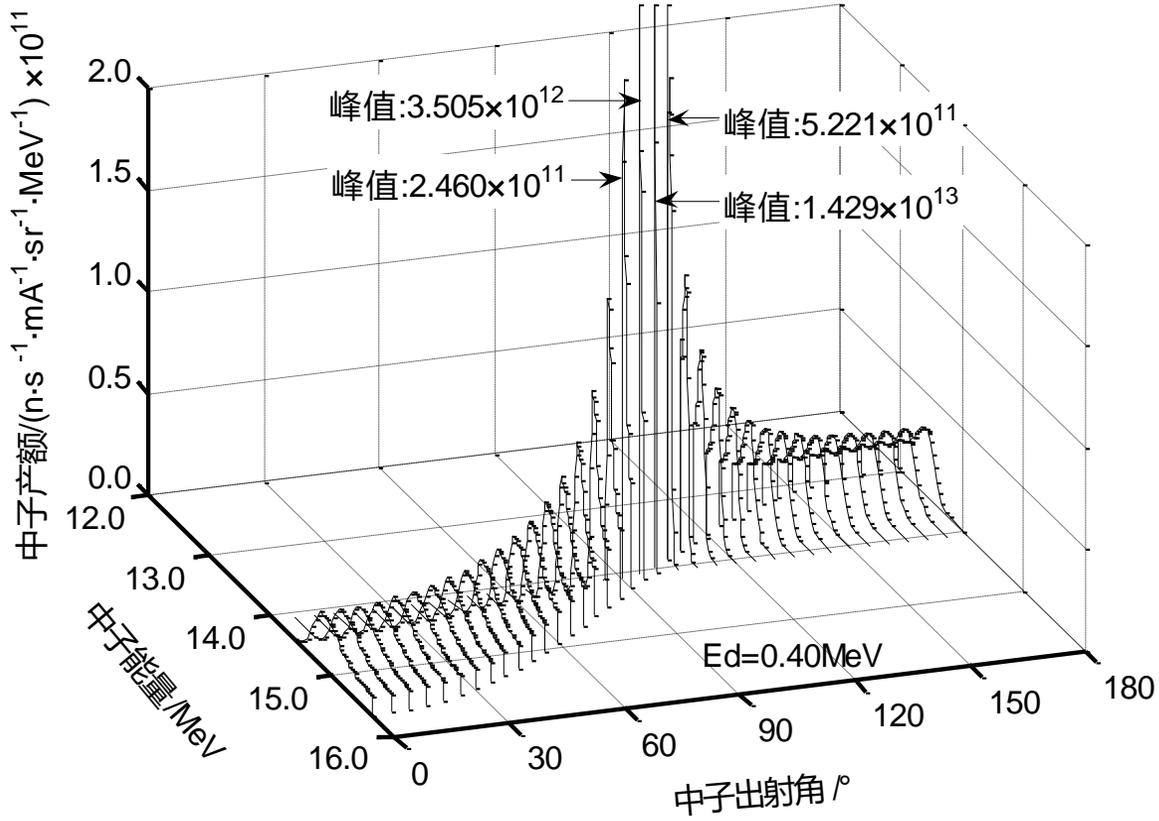
3) 中子能谱

$$E_n(\theta, E_d) = \left\{ \frac{\sqrt{2E_d}}{4} \cos\theta + \left[\left(\frac{1}{4} + \frac{1}{8} \cos^2\theta \right) E_d + \frac{3}{4} Q \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^2$$

$$\frac{dY_j}{d\Omega dE_n}(\theta, E_{n,j}) = \frac{\frac{dY_j}{d\Omega}(\theta, E_{d,j})}{\Delta E_{n,j}}$$



发展了专用计算软件dTTdyET)

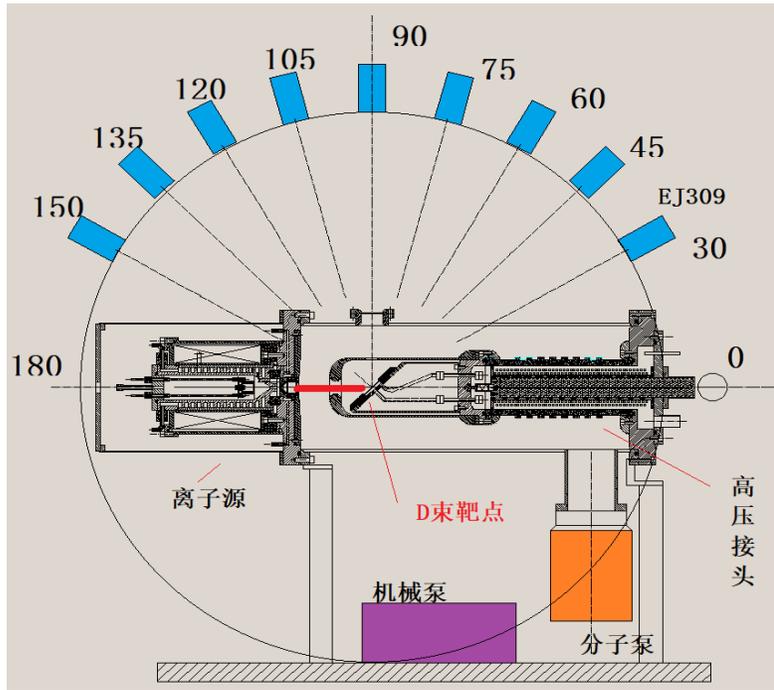


——根据能谱和角分布，
可构建用于蒙卡模拟的高精度D-D/D-T中子源模型

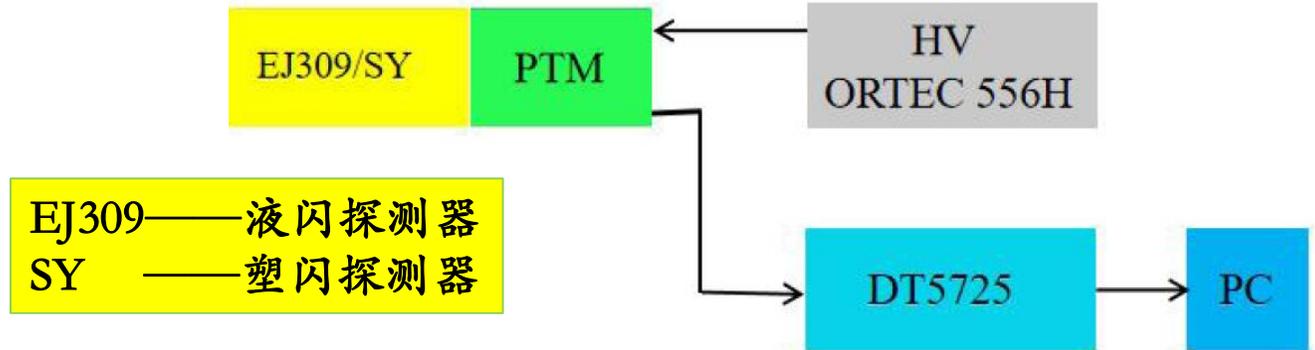
三、中子发生器中子辐射场研究

2、D-D中子能谱的实验测量

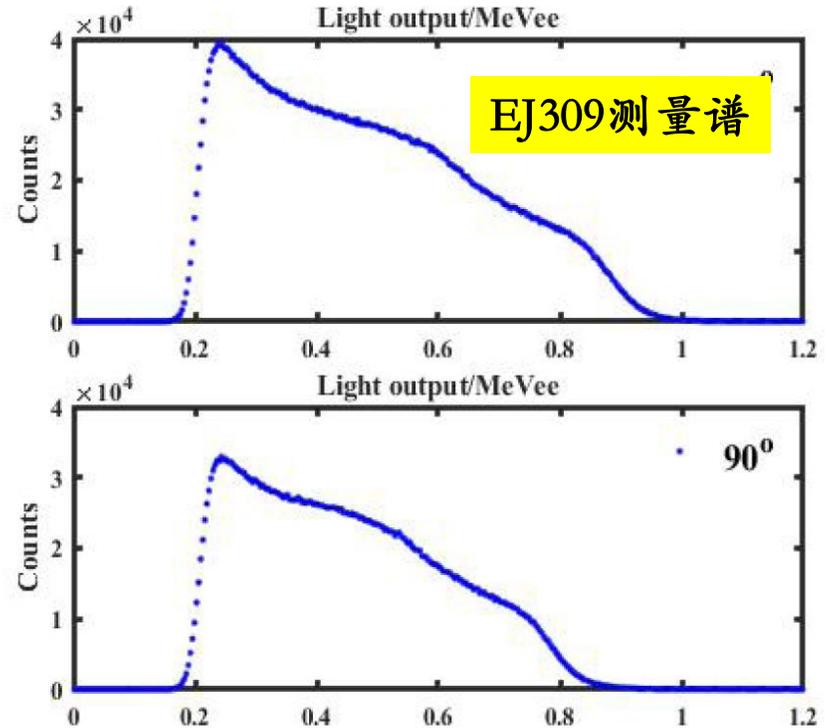
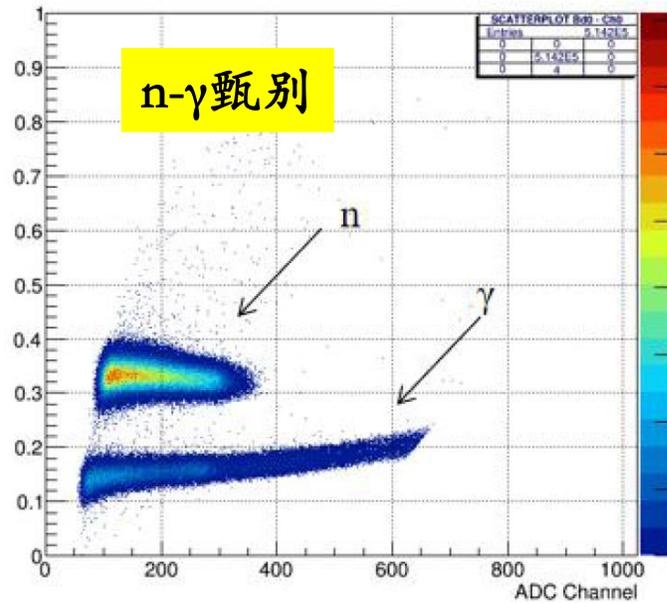
◆ 紧凑型中子发生器D-D中子能谱测量布局



反冲质子法中子能谱测量



EJ309——液闪探测器
SY ——塑闪探测器



三、中子发生器中子辐射场研究

2、D-D中子能谱的实验测量

◆能谱反演方法

矩阵方程：

$$\begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ \vdots \\ N_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & \cdots & R_{2n} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & \cdots & R_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{m1} & R_{m2} & R_{m3} & \cdots & R_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \\ \vdots \\ \phi_n \end{bmatrix}$$

测量谱

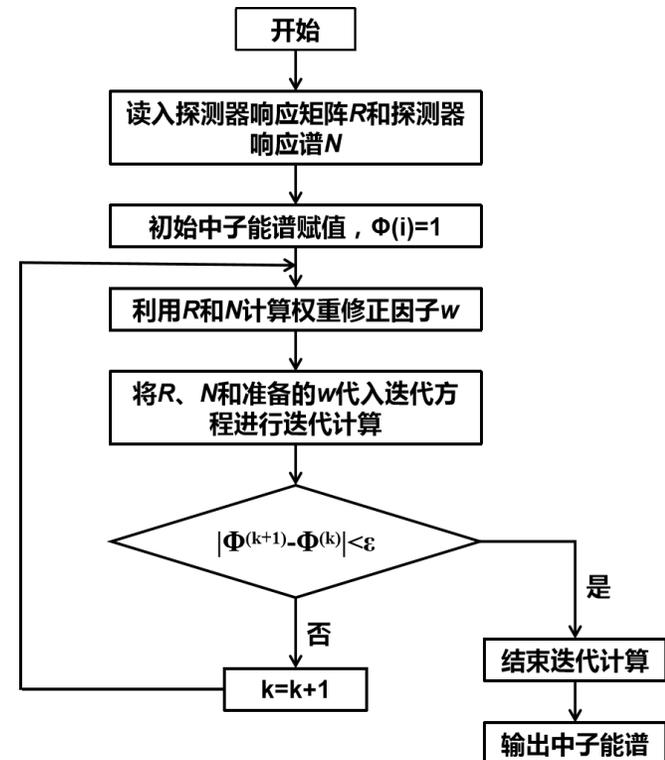
探测器响应矩阵
M-C模拟获得

中子谱

迭代方程：

$$\phi_j^{k+1} = \phi_j^k \exp \left(\frac{\sum_{i=1}^m W_{ij}^k \ln \left(N_i / \sum_{j=1}^n R_{ij} \cdot \phi_j^k \right)}{\sum_{i=1}^m W_{ij}^k} \right)$$

迭代算：

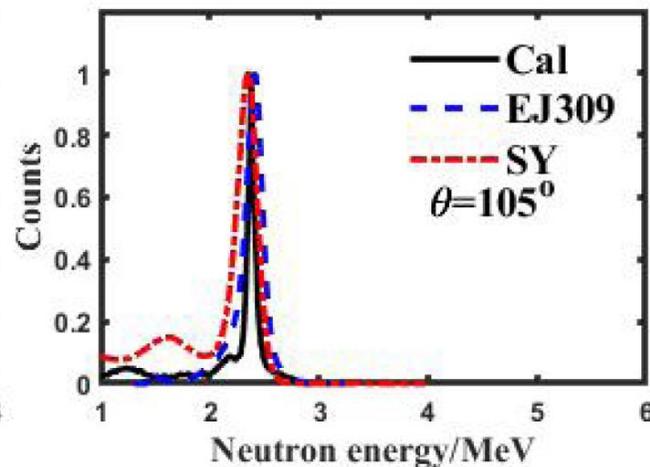
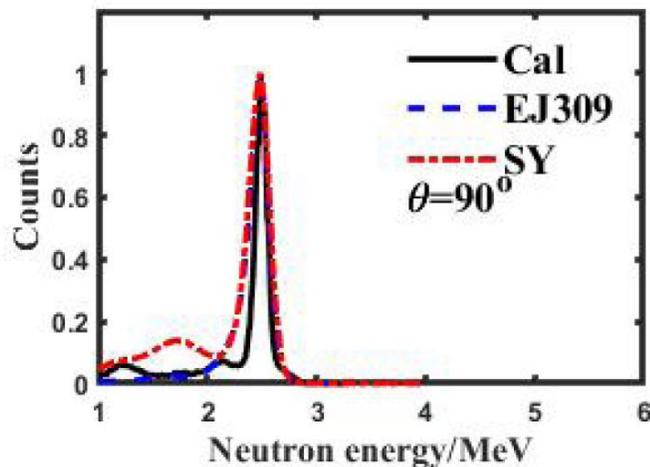
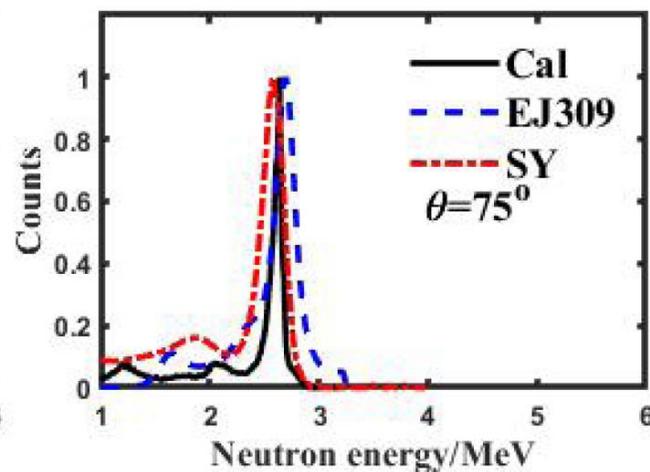
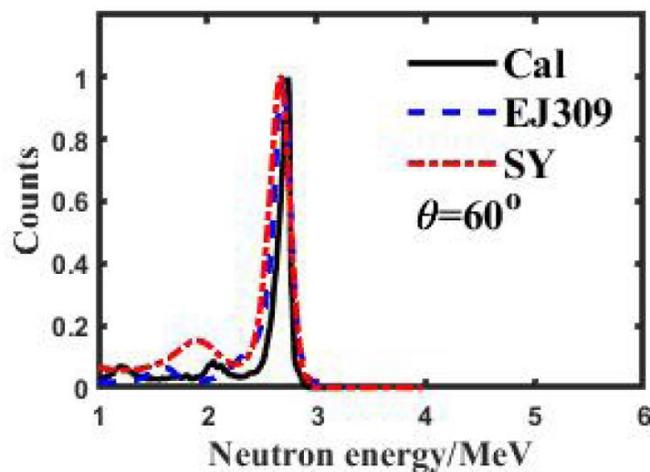


三、中子发生器中子辐射场研究

2、D-D中子能谱的实验测量

◆ 测量结果与MC模拟结果比较

- 测量和模拟数据符合较好；
- 能较好反应D-D中子能谱特征。



汇报内容

- 一、历史回顾
- 二、新一代强流中子发生器研制及应用
- 三、紧凑型中子发生器研制
- 四、中子发生器中子辐射场研究
- 五、紧凑型中子发生器应用及展望**
- 六、总结

五、紧凑型中子发生器应用及展望

1、作为小型化标准中子源



——2.5MeV的准单能快中子



——14.5MeV的准单能快中子

◆ 用于中子探测器研制中的测试及刻度；

——已研制4台，其中2台已提供用户
(中船重工719、苏州热工研究院)

◆ 用于单粒子反转效应和抗辐射加固研究；

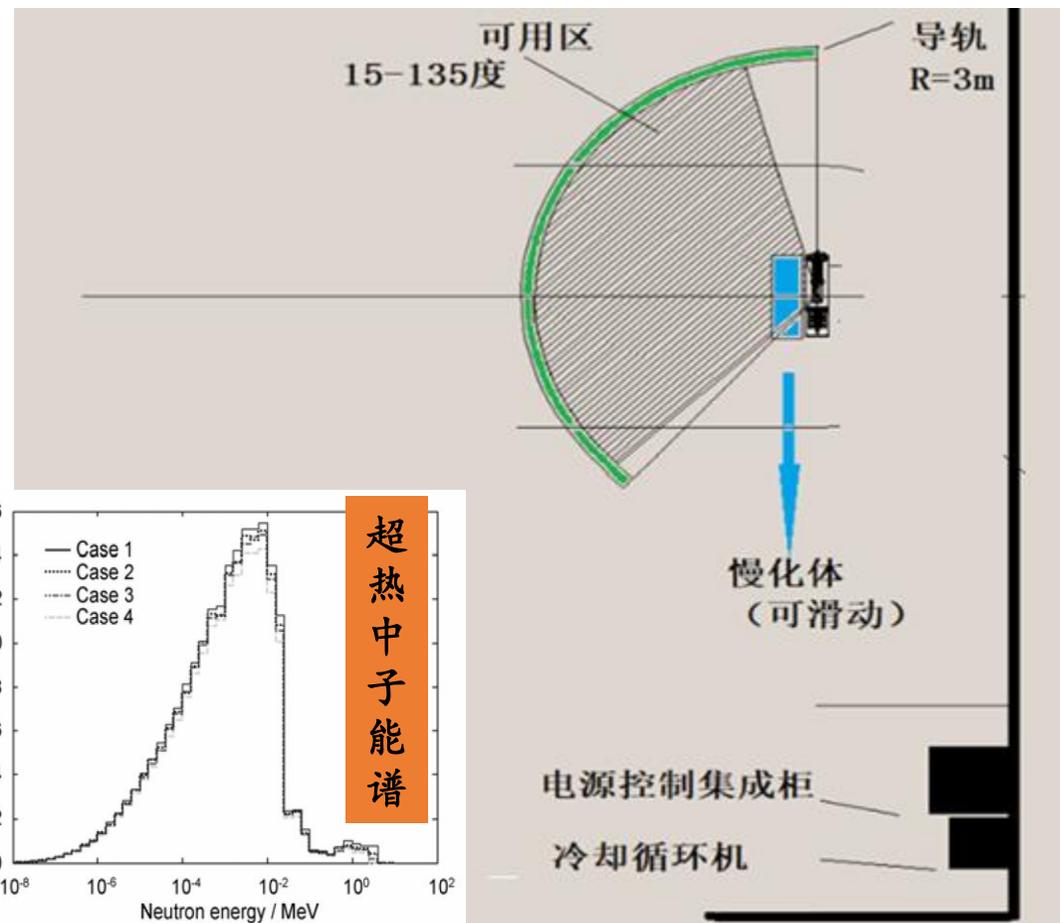
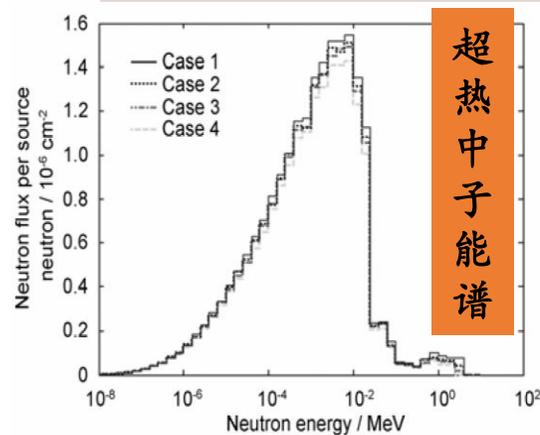
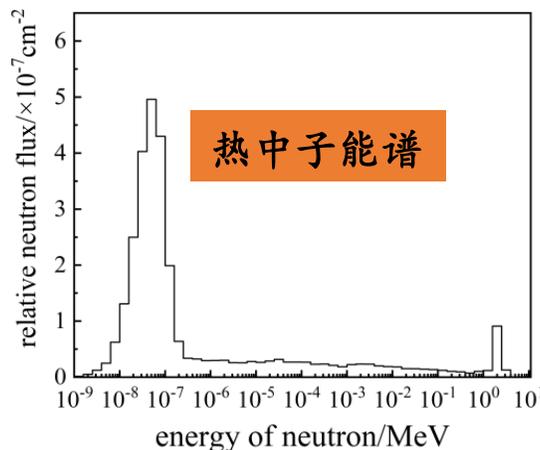
◆ 用于建立标准中子剂量场

——2.5MeV快中子场

——14.5MeV快中子场

——热中子场

——共振中子场



五、紧凑型中子发生器应用及展望

2、可作为中子应用技术系统开发小型可控中子源

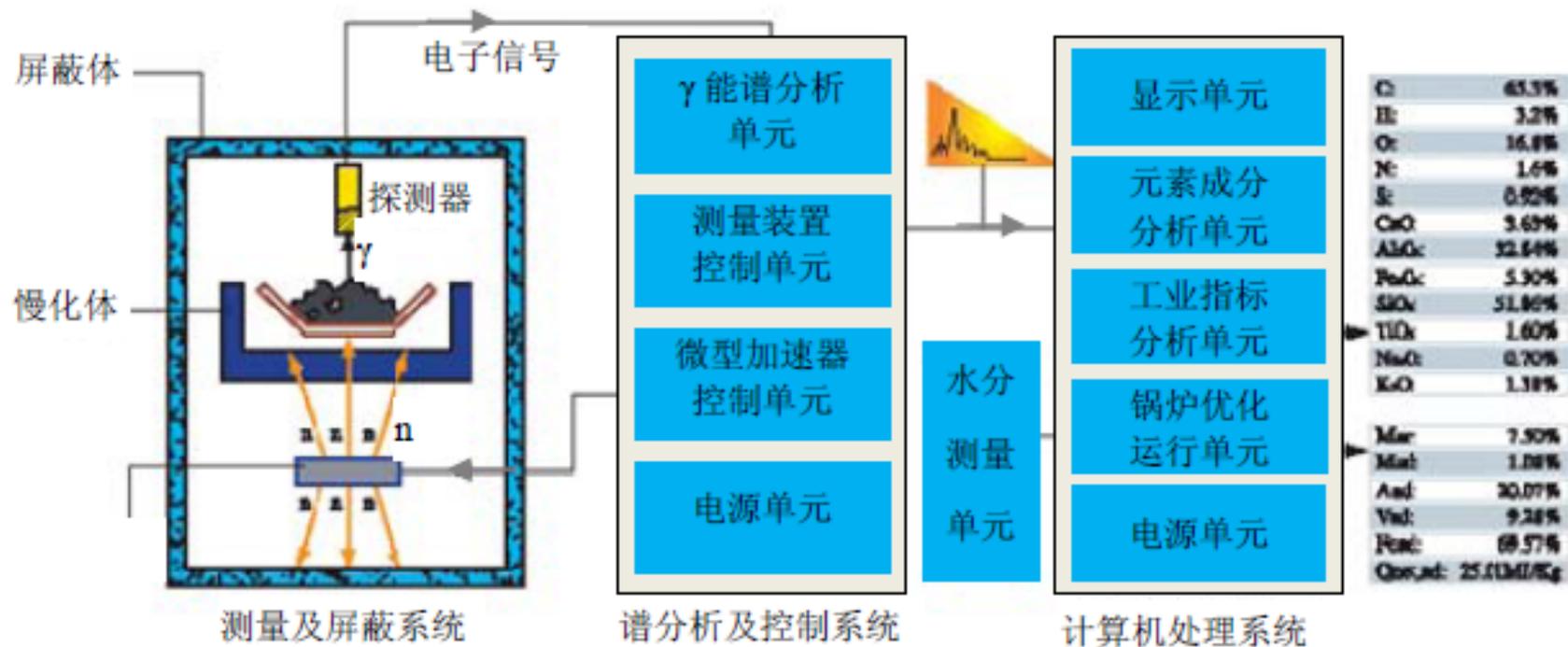
1) 活化分析

——工业物料在线成分分析系统

如：水泥、冶金、煤炭行业等。

——替代 Cf-252 同位素中子源

——取样成分分析



五、紧凑型中子发生器应用及展望

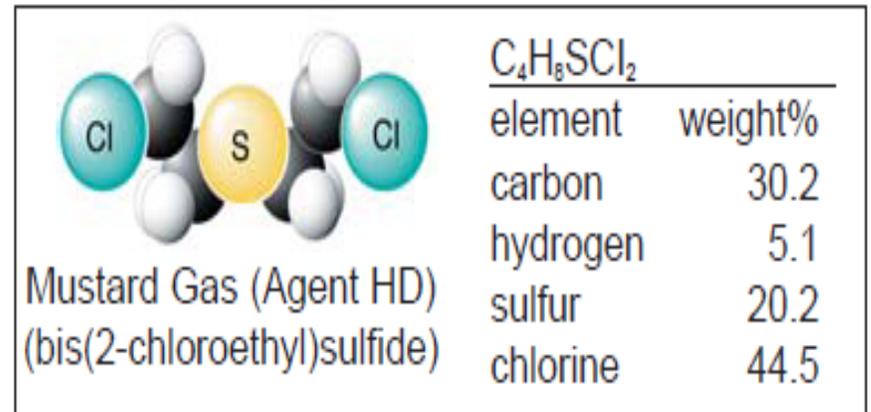
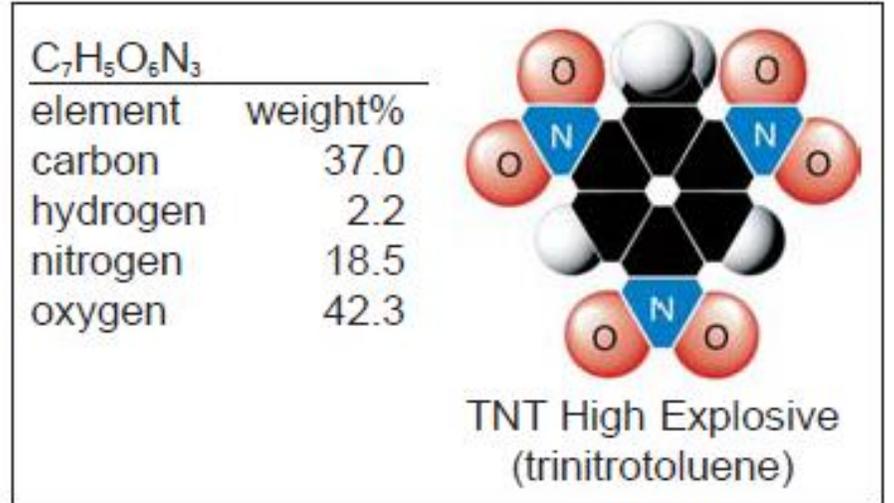
2、可作为中子应用技术系统开发小型可控中子源

1) 活化分析

——危险品检测

如：爆炸物、化学武器

——替代 $Cf-252$ 同位素中子源

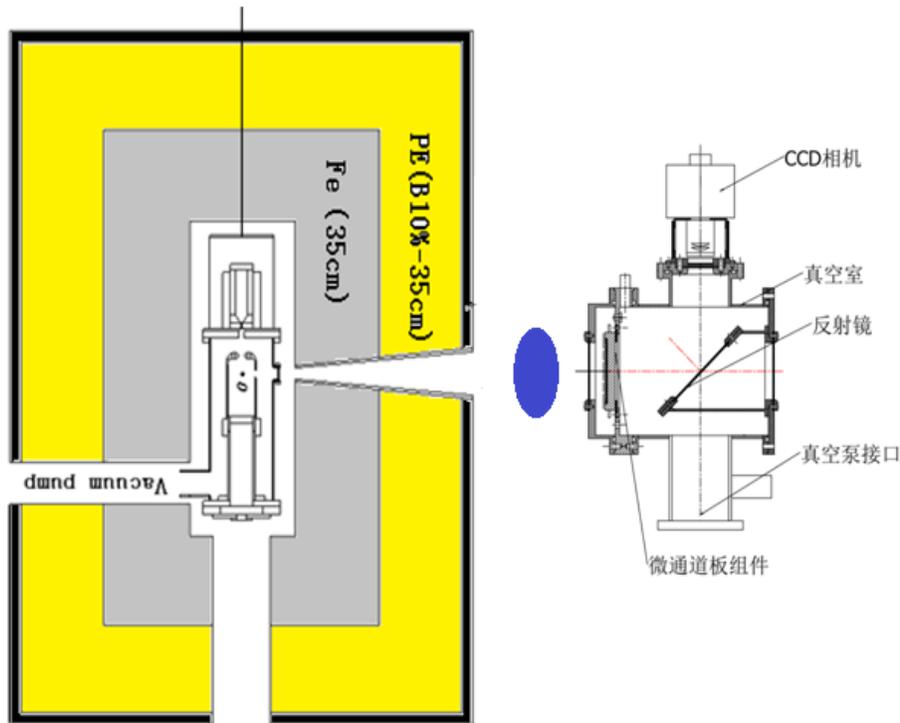


五、紧凑型中子发生器应用及展望

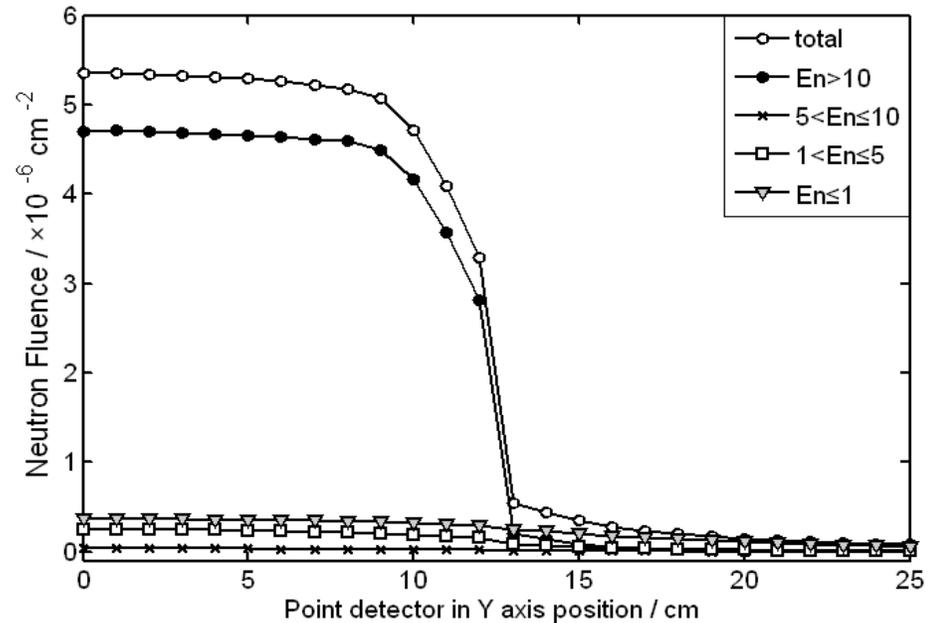
2、可作为中子应用技术系统开发小型可控中子源

2) 发展小型化可移动快中子照相系统

◆自屏蔽准直器及中子束特性



- D-T反应14.5MeV快中子
- D-T中子产额 $>1 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$
- 物平面（距靶点2m）中子注量率 $>1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- 视野范围中子注量率不均匀度约5%



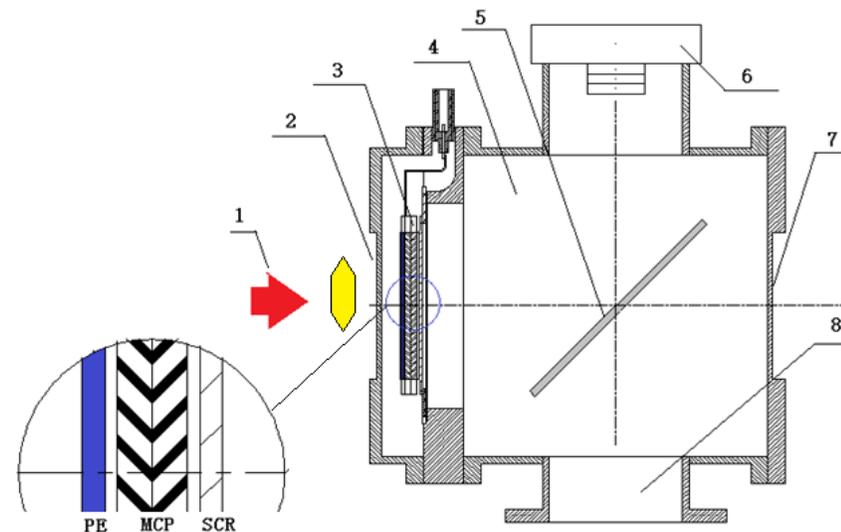
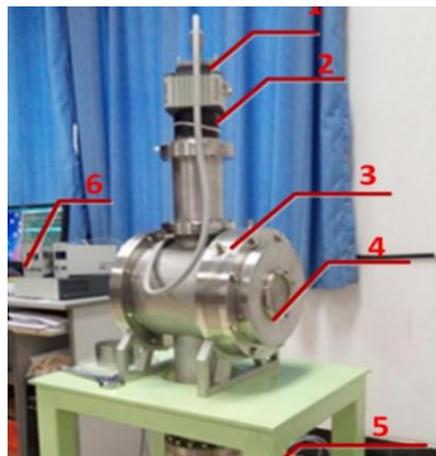
五、紧凑型中子发生器应用及展望

2、可作为中子应用技术系统开发的小型可控中子源

2) 发展小型化快中子照相系统

◆ 快中子像探测器及成像测试

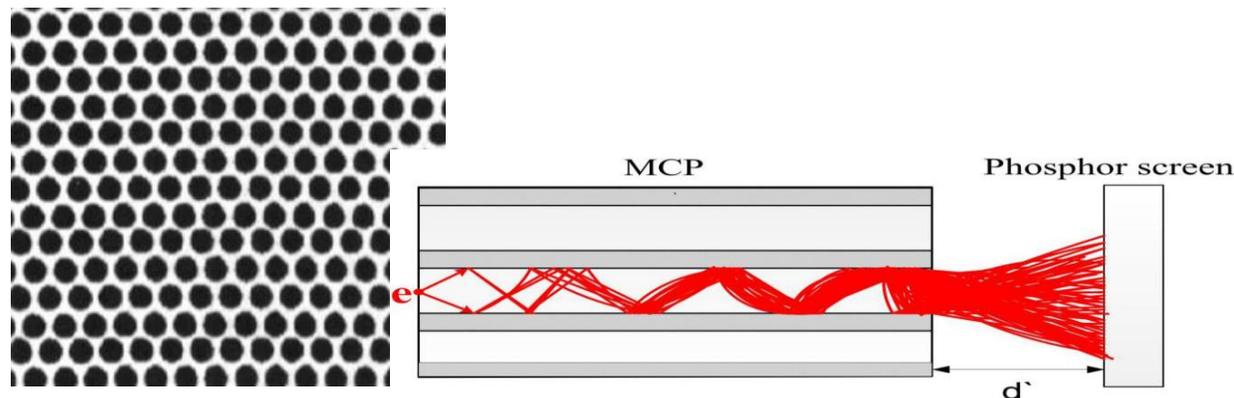
——发展了基于微通道板 (MCP) 的快中子像探测器



1-中子束；2-入射窗；3-PE+MCP+SCR；4-真空室；5-反射镜；6-CCD相机；7-初射窗；8-真空抽气口

工作原理：

- 快中子与MCP作用产生带电粒子；
- 带电粒子MCP微孔中产生电子(e)并倍增；
- e 轰击荧光屏上发光；
- 光子经反射镜进入CCD 相成像



◆ 快中子像探测器及成像测试

★ 条件

- D-T中子注量率： $1.3 \times 10^4 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- 成像时间：约5min

★ 复合材料样品成像测试

- 多材料圆柱体样品，厚40mm，直径60mm
- 曝光时间300s
- 看到了不同材料图像的灰度差异

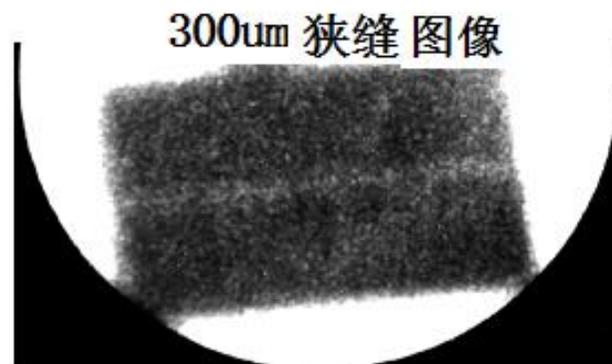
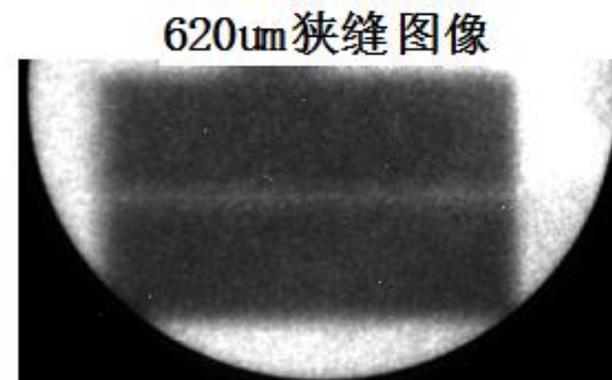
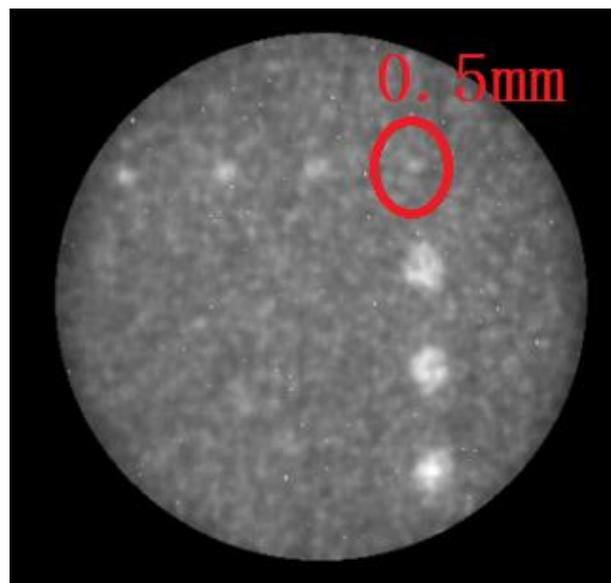
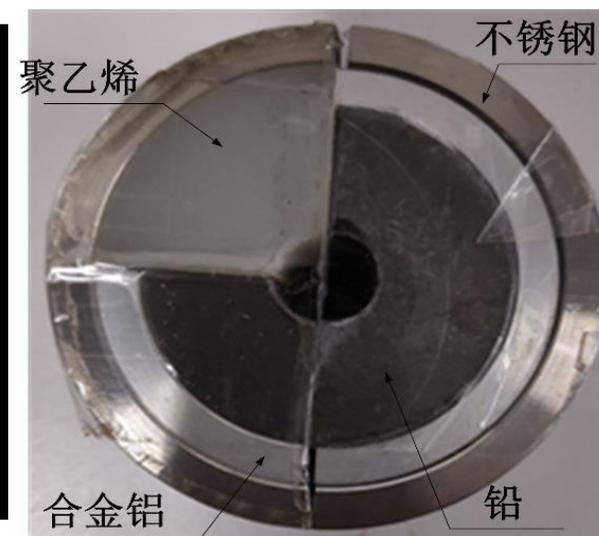
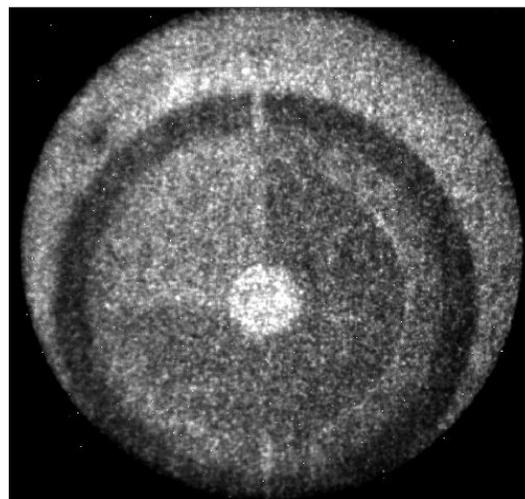
★ 狭缝样品成像测试

- 看到了亚毫米量级的狭缝图像；

★ 圆孔样品成像测试

- 不锈钢板圆孔样品
- 0.5mm孔可见。

——空间分辨约 $500 \mu\text{m}$



五、紧凑型中子发生器应用及展望

2、可作为中子应用技术系统开发的小型可控中子源

3) 发展小型化可移动热中子照相系统

◆ 慢化准直器设计及中子束特性

——D-D反应2.45MeV快中子

——D-D中子产额 $>5 \times 10^8 \text{ S}^{-1}$

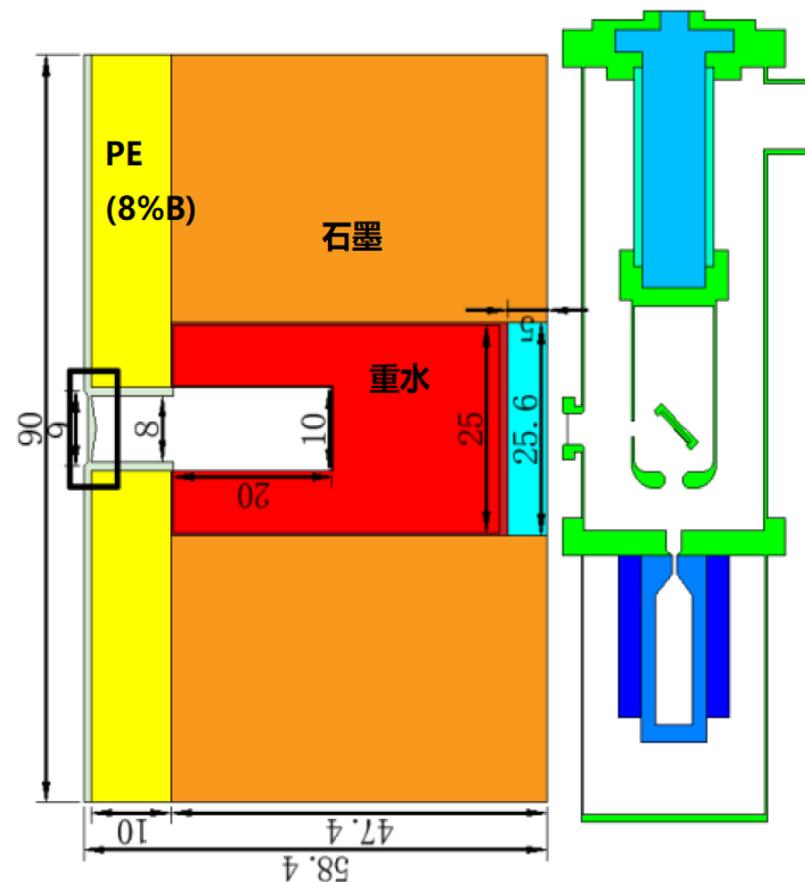
——物平面（距靶点80cm）热中子注量率 $>1 \times 10^3 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

——视野范围（ $\Phi 70\text{mm}$ ）中子注量率不均匀度约7%

——热中子占比约75%

——需进一步提高D-D反应中子产额

——D-D中子产额： 10^9 S^{-1} 、 10^{10} S^{-1}



五、紧凑型中子发生器应用及展望

2、可作为中子应用技术系统开发的可控中子源

4) 用于核燃料棒U-235富集度及分布均匀性检测

◆ 原理：

——裂变碎片 γ 射线强度与U235富集度成正比

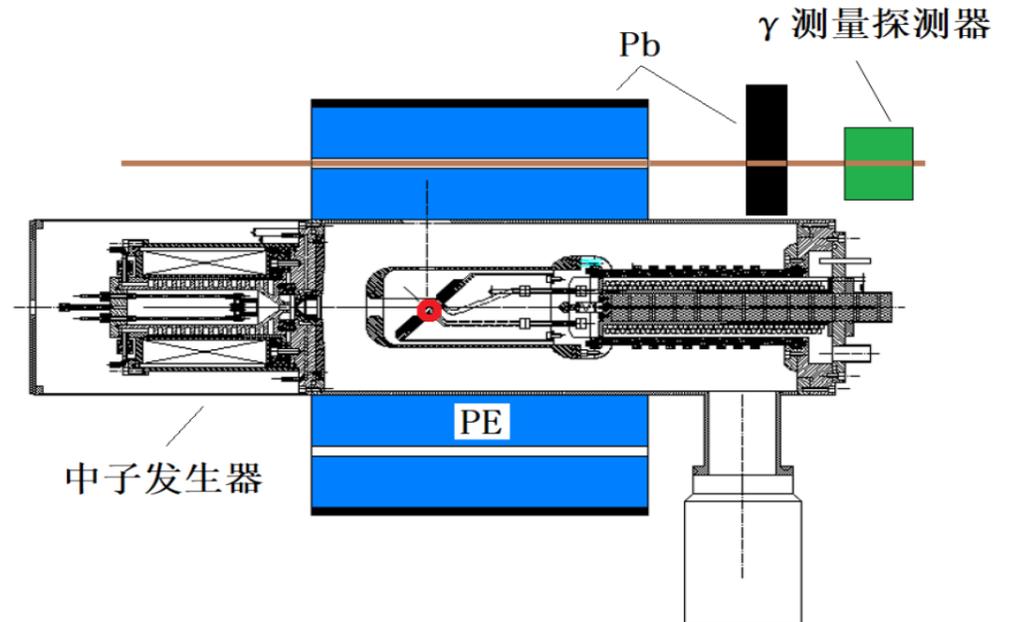
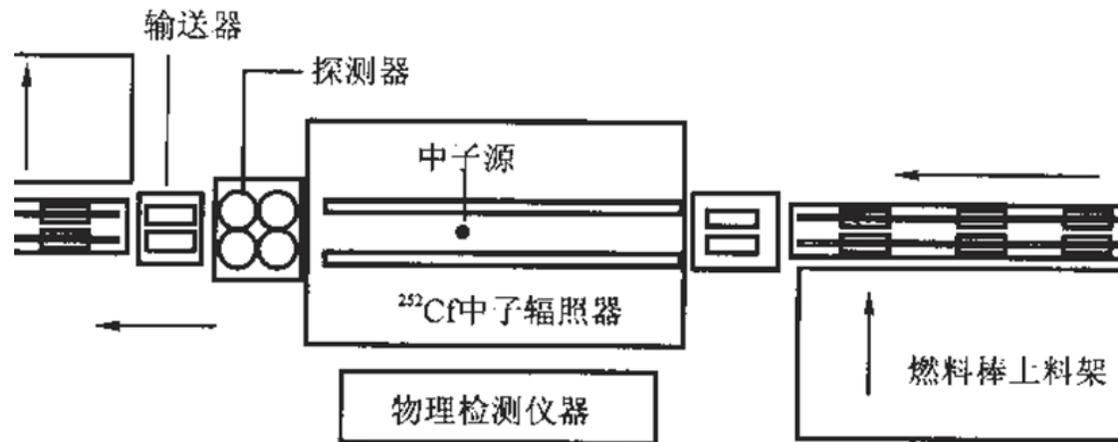
◆ 问题：

——使用Cf-252同位素中子源

——面临检测停止的窘境

——紧凑型D-D可控中子源是解决问题的途径

◆ 基于紧凑型中子发生器的解决方案

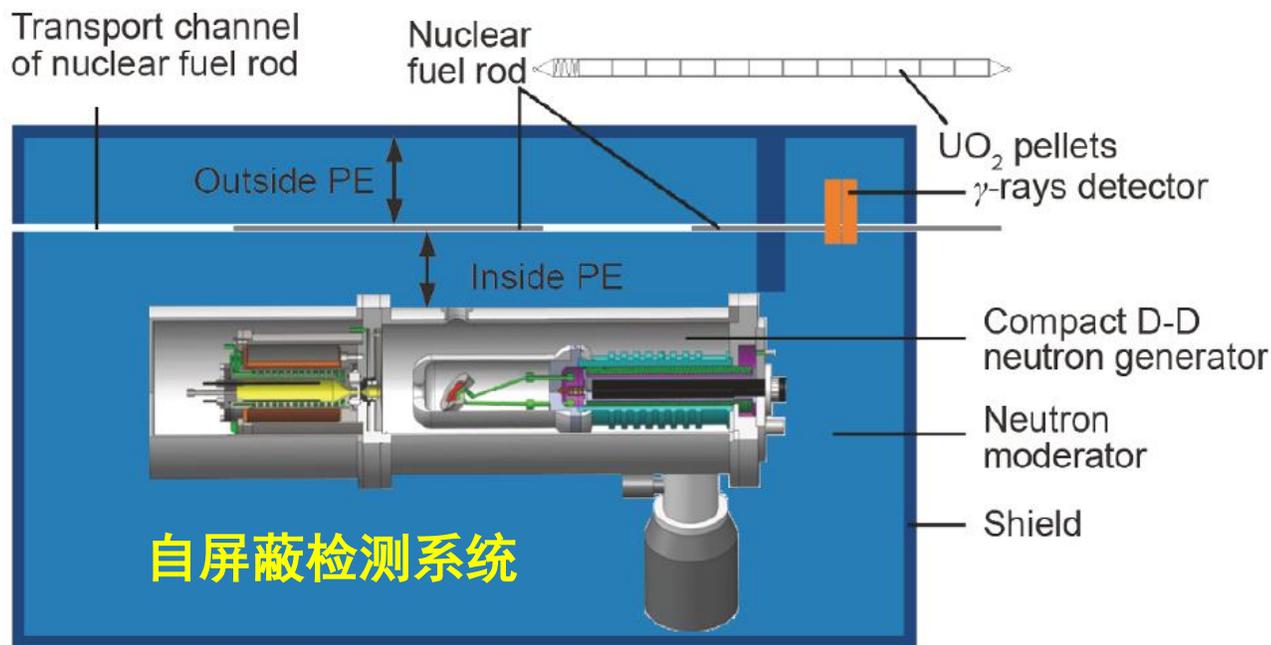


五、紧凑型中子发生器应用及展望

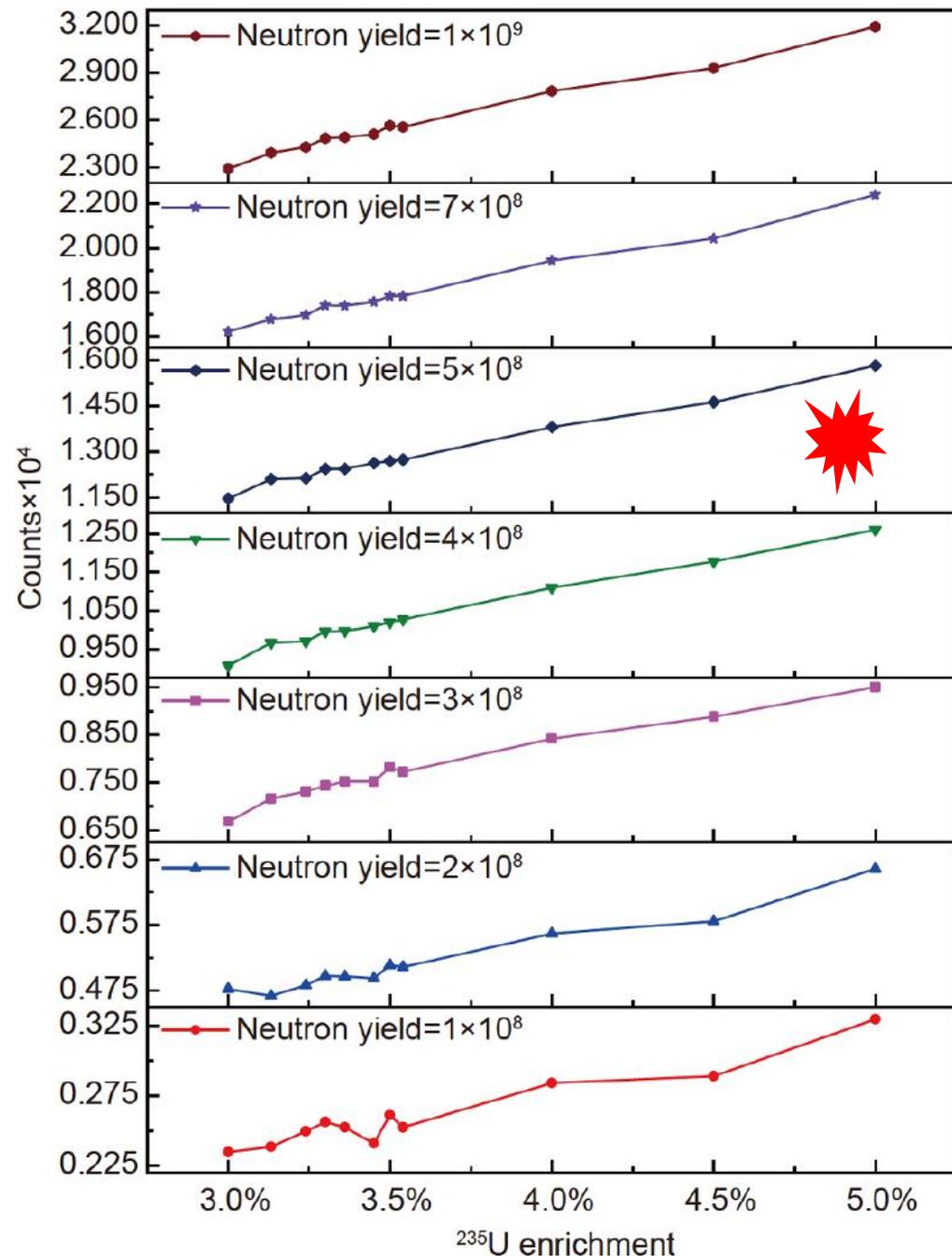
2、可作为中子应用技术系统开发的可控中子源

4) 核燃料棒U-235富集度及分布均匀性检测

◆ 物理和结构设计



——D-D中子产额 $\geq 5 \times 10^9$ n/s即可满足要求



汇报内容

- 一、历史回顾
- 二、新一代强流中子发生器研制及应用
- 三、紧凑型中子发生器研制
- 四、中子发生器中子辐射场研究
- 五、紧凑型中子发生器应用及展望
- 六、总结**

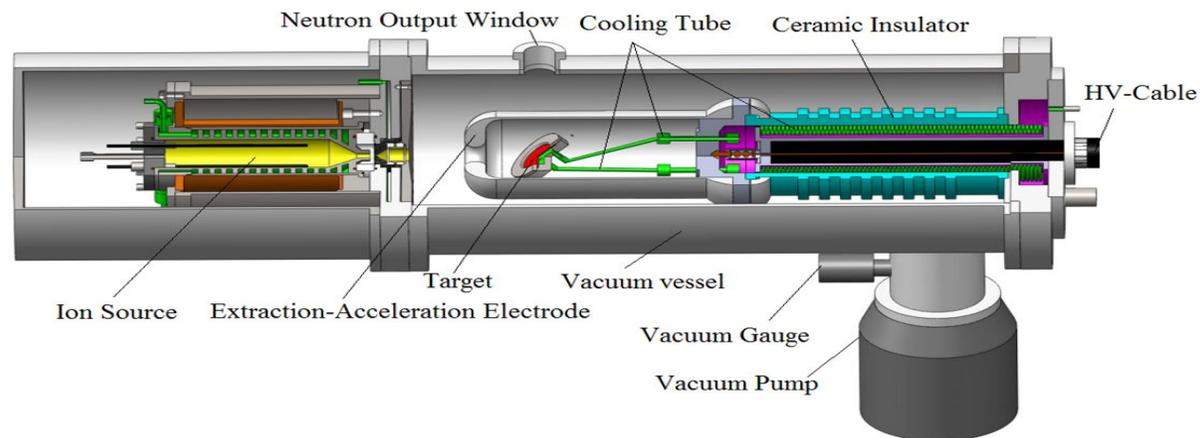
六、总结

1、发展新一代强流中子发生器

- 为快中物理研究服务；
- 为快中应用技术基础研究服务

2、成功研制了紧凑型中子发生

- D-D中子产额： 5×10^8 —— 10^9 n/s
- D-T中子产额： 5×10^{10} —— 10^{11} n/s



2、基于紧凑型中子发生，研发小型中子应用技术系统

- 标准单能快中子源及标准辐射场
- 中子活化分析（在线、离线）
- 小型化可移动中子照相（快中子、热中子）
- 中子核材料检测（燃料元件U-235富集度、损耗、特殊核材料核查……等）



谢谢关注!

兰州大学中子应用技术教育部工程研究中心

兰州大学中子物理与中子应用技术研究

兰州大学核科学与技术学院

• 2023.09.20 ◆ 西安